Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Mechanical Properties and Durability of Cement Composites Containing Feldspar, Silica Fume, and Short Metal Fibers

Research Article

Abdolreza Jahri Shijani[1], Ali Sadre Momtazi[2], Arian Darvishalinezhad[3], Reza Kahani Khoshkbijari[4]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.80702.1211

1- Introduction

Cementitious materials are widely used in many civil engineering projects today due to various advantages, such as easy access to constituent materials, convenient transportation, high compressive strength, and easy implementation. Achieving innovative technologies in the construction industry has always been of particular importance to researchers. The increasing demand for cement production has led to a rise in cement production levels. This has raised concerns regarding the increased emission of pollutants resulting from the cement production process. One of the proposed solutions by researchers is the use of alternative cementitious materials in cement production. The use of pozzolanic materials not only has environmental benefits but also improves some of the mechanical and durability properties of cementitious composites. Simultaneous use of fibers and quasi-cementitious materials can lead to cement composites with desirable mechanical and durability characteristics, which will be investigated in this study using laboratory methods. One of the drawbacks of cementitious materials is their weakness under tensile stresses. Tensile stresses, resulting from tensile and flexural forces, lead to the formation of cracks in these materials. The use of fibers partially compensates for this weakness and improves the performance of cement composites under tensile forces. The application of fibers will play an effective role in increasing tensile strength and preventing crack propagation in cement composites. Various research results in the field of concrete technology indicate that cement composites are made to increase strength and ductility by adding a small volume of fibers to cement mortar. Engineered cementitious compounds containing fibers possess desirable properties, such as high tensile strain capacity, fracture energy, and high strength, making them ideal materials for diverse structural applications, including structures resistant to compression and impact. Today, considering the importance of sustainable development, taking into account the detrimental effects of various industries on the environment is crucial. One of the major industries contributing significantly to greenhouse gas emissions is the cement production industry. Supplementary cementitious materials are widely used in the production of concrete and cement mortars, serving as additives in the used mixtures. In recent years, the use of these materials has increased due to environmental advantages, reduction of energy consumption following reduced cement consumption, and influence on the final properties of materials.

The production of concrete has reached approximately three billion tons per year, and it is predicted to increase to four billion tons per year. This trend is more pronounced in some countries, such as China, India, and countries in the Middle East and North Africa. The increasing production of concrete in the world has posed various challenges to the cement industry, including environmental damage, raw material supply, and augmented energy consumption. The increased use of quasi-cementitious materials as a partial replacement for cement can somewhat reduce the detrimental effects of increased cement production and simultaneously provide benefits for the usability and resistance of the final product in high ages and improvement of durability against aggressive environments. Pozzolanic materials are silica and alumina materials that, in the presence of water at normal temperatures, are combined with lime and form stable and insoluble materials (gel) with cementitious properties. Blast furnace slag, microsilica, and fly ash are among the pozzolanic materials that can be partially replaced with cement and alters one or more final characteristics of the final cement product.

2- Utilized Materials

The main components comprising the laboratory specimens in the current study are aggregate, cement, and water. To achieve predefined objectives, microsilica and

*Manuscript received January 18, 2023, Revised April 9, 2024, Accepted May 6, 2024.

[1] MSc in Civil Engineering (Structural Engineering), Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

[2] Professor, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. sadrmomtazi@guilan.ac.ir

[3] Corresponding author, Graduate in Civil Engineering (Structural Engineering), Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. **Email**: aryan.darvishalinezhad@outlook.com

[4] PhD in Civil Engineering (Structural Engineering), Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

feldspar were employed as partial substitutes for cement in the cement mixture at varying weight percentages.

3- Test Procedures

In this research, compressive strength tests were conducted according to the ASTM C109 standard, and specimens were tested at ages 7, 28, and 90 days after curing. Flexural strength testing was performed using the center-loading method based on the ASTM C293-94 standard. Specimens were tested up to the age of 28 days after curing. Direct tensile testing was conducted on all laboratory specimens after their curing up to 28 days. This test was performed based on the AASHTO T132 standard. Water absorption of the tested specimens was determined according to the ASTM C642 standard for cubic specimens. Electrical resistivity testing was conducted following the ASTM C1202 standard. Figure 1 illustrates the microstructure of the design 19 pattern containing 10% feldspar and 5% microsilica in the unheated state magnified by KX50.

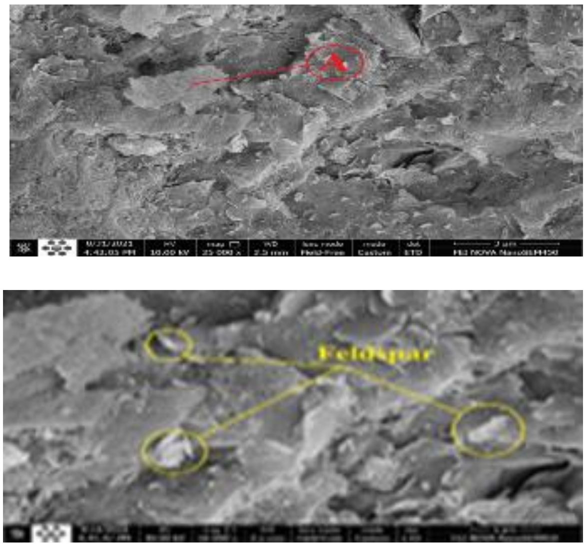


Figure 1: Microstructure of Sample 19 containing 10% feldspar and 5% microsilica in the untreated state

4- Conclusion

1- All samples with individual substitution of feldspar showed lower compressive strength after 28 days compared to the control. The presence of fibers in this group of samples improved compressive strength, with all fiber-reinforced samples exhibiting increased strength compared to the control.

2- The results indicated that although compressive strength rose with the age of curing up to 90 days, the compressive strength of samples with only feldspar substitution (at all substitution percentages) remained lower than that of the control sample. The presence of steel fibers compensated to a significant extent for the negative effect of feldspar substitution, leading to higher compressive strength than the control sample. For instance, in the case of 15% feldspar substitution, the use of 1% steel fibers resulted in a 7.25% improvement in compressive strength compared to the control sample.

3- According to the results, the presence of steel fibers caused a reduction in the rate of strength loss under high temperatures in some samples to an acceptable extent. For example, in a sample with 5% feldspar substitution, the presence of steel fibers reduced the decrease in compressive strength from 67.5% to 40.8%.

4- All samples containing 1% steel fibers, regardless of the percentage of feldspar and microsilica substitution, exhibited higher flexural strength compared to the control sample. The individual use of feldspar as a partial substitute for cement did not significantly affect flexural strength results, but an increase in the percentage of microsilica substitution led to improved flexural strength.

5- Among samples containing fibers, the highest flexural strength was achieved in samples with 10% microsilica and 10% feldspar substitution, resulting in 46% and 29% higher flexural strength, respectively, compared to the control sample.

6- Based on the microstructure results of sample design 19, the overall structure of the paste after exposure to high temperature showed very low porosity and voids, which can be attributed to the presence and reactions of feldspar in the sample structure. An important point in this design is that after exposure to a temperature of 600°C, significant amounts of C-S-H structures were observed, which is associated with the presence of feldspar in this composite.

مهندسی عمران فردوسی،۳۷، ۲، ۱۴۰۳. (۸۲-۵۱)

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن بتن ایران

انجمن مهندسی روسازی ایران

بررسی مشخصات مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی حاوی فلدسپات، دوده سیلیس و الیاف فلزی کوتاه*

مقاله پژوهشی

عبدالرضا جهری شیجانی[۱] علی صدر ممتازی[۲] آرین درویشعلی نژاد[۳] رضا کهنی خشکبیجاری[۴]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.80702.1211

چکیده در این مقاله اثر استفاده از درصدهای مختلف وزنی مواد با خاصیت پوزولانی همچون فلدسپات و میکروسیلیس (به عنوان جایگزین بخشی از سیمان) بر مشخصات مکانیکی و دوامی آزمونه ها بررسی شده است. مطالعهٔ اثر کاربرد الیاف فولادی با درصد حجمی ۱٪، بر خواص مکانیکی کامپوزیت سیمانی از دیگر اهداف این تحقیق است. در پژوهش حاضر ۱۹ طرح اختلاط از کامپوزیت های سیمانی، حاوی میکروسیلیس، فلدسپات و الیاف فولادی ساخته شده‌اند. فلدسپات و میکروسیلیس با درصدهای وزنی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ به صورت انفرادی و ترکیبی با سیمان جایگزین شدند. در مخلوط نمونه شاهد مقدار سیمان برابر ۷۰۰ $\frac{Kg}{m^3}$ و نسبت آب به سیمان برای تمامی نمونه طرح ها ثابت و برابر ۰/۳ در نظر گرفته شد. خصوصیات مورد بررسی شامل: مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی به روش مستقیم، درصد جذب آب اولیه و نهایی، مقاومت الکتریکی و بررسی ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بوده است. مقاومت فشاری نمونه های کامپوزیت سیمانی در سنین ۷، ۲۸ و۹۰ روزه تعیین گردید. نتایج نشان داد در نمونه هایی که فلدسپات جایگزین سیمان شده بود؛ مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونهٔ شاهد کاهش داشت. در نمونه های حاوی الیاف فلزی کوتاه، بهبود مقاومت فشاری مشاهده شد؛ به طوری که همهٔ نمونه های الیافی نسبت به نمونهٔ شاهد افزایش مقاومت داشتند. در میان نمونه های فاقد الیاف، کمترین میزان افت مقاومت فشاری بر اثر حرارت به نمونه طرح با جایگزینی ۱۵٪ فلدسپات اختصاص داشت. همهٔ نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی بدون توجه به درصد جایگزینی فلدسپات و میکروسیلیس، مقاومت خمشی بالاتری را نتیجه دادند.

واژه‌های کلیدی کامپوزیت سیمانی، فلدسپات، میکرو سیلیس، الیاف فولادی، دوام.

Investigation of Mechanical Properties and Durability of Cement Composites Containing Feldspar, Silica Fume, and Short Metal Fibers

A.R. Jahri Sheijani A. Sadr Momtazi A. Darvishalinezhad R. Kohani Khoshkbijari

Abstract *In this article, the effect of using different weight percentages of materials with pozzolanic properties, such as feldspar and microsilica (as a partial substitute for cement) on the mechanical and durability characteristics of the specimens, has been investigated. Studying the effect of using steel fibers with a volume percentage of 1% on the mechanical properties of cement composite is one of the other goals of this research. In the current research, 19 mixing plans were made from cement composites containing microsilica, feldspar and steel fibers. Feldspar and microsilica with weight percentages of 5%, 10% and 15% individually and in combination were replaced with cement. The examined properties include: compressive strength, Bending strength, tensile strength by direct, electrical resistance, percentage of water absorption and (SEM). The results showed that in samples containing short metal fibers, an improvement in compressive strength was observed; So that all the fiber samples had increased resistance compared to the control sample. Among the samples without fibers, the lowest amount of compressive strength loss due to heat was assigned to the design sample with 15% feldspar replacement. All samples containing 1% steel fibers, regardless of the replacement percentage of feldspar and microsilica, resulted in higher bending strength.*

Keywords Cementitious Composite, Feldspar, Silica Fume, Steel fiber, Durability.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۲۸و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۲/۱۷می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(۲) استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(۳) نویسنده مسئول: کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

Email: aryan.darvishalinezhad@outlook.com

(۴) دکترای تخصصی، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

مقدمه

مصالح سیمانی به دلیل داشتن مزایایی همچون دسترسی راحت به مواد تشکیل دهنده، حمل و نقل آسان، مقاومت فشاری بالا، اجرای آسان امروزه در بسیاری از پروژه‌های عمرانی کاربرد دارند. دست‌یابی به فناوری‌های نوین در صنعت ساختمان به عنوان یکی از اهداف اصلی محققان همواره از اهمیت خاصی برخوردار است. افزایش تقاضا برای تولید مصالح سیمانی، باعث شده میزان تولید سیمان افزایش یابد. این موضوع به سبب افزایش انتشار گازهای آلاینده ناشی از فرآیند تولید سیمان، نگرانی‌هایی را ایجاد کرده است. یکی از راه حل‌های پیشنهادی از سوی محققان کاربرد مواد جایگزین سیمان در ساخت مصالح سیمانی است. استفاده از مواد پوزولانی علاوه بر مزایای زیست محیطی ممکن است باعث شود برخی از خواص مکانیکی و دوامی کامپوزیت سیمانی بهبود یابد. استفادهٔ همزمان از الیاف و مواد شبه سیمانی موجب دست‌یابی به کامپوزیت سیمانی با مشخصات مکانیکی و دوامی مطلوب می‌گردد که در این پژوهش با استفاده از روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

یکی از عیوب مصالح سیمانی، ضعف آنها تحت اثر تنش‌های کششی است. تنش‌های ناشی از نیروی کششی و خمشی باعث ایجاد ترک در این مصالح می‌شود، استفاده از الیاف تا حدودی این ضعف را جبران می‌کند و سبب بهبود عملکرد کامپوزیت سیمانی تحت اثر نیروهای کششی شود. کاربرد الیاف در افزایش مقاومت کششی و جلوگیری از گسترش ترک در کامپوزیت سیمانی نقش مؤثری خواهد داشت. نتایج پژوهش‌های مختلف در حوزهٔ تکنولوژی بتن نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های سیمانی با هدف افزایش مقاومت و شکل‌پذیری از طریق افزودن حجم کمی از الیاف به ملات سیمانی ساخته می‌شوند. ترکیبات سیمانی مهندسی شده حاوی الیاف از ویژگی‌های مطلوبی همچون ظرفیت تغییر شکل کششی بالا ، انرژی شکست و استحکام بالا برخوردارند که آنها را به موادی ایده‌آل برای کاربردهای ساختاری مختلف شامل سازه‌های مقاوم در برابر فشار و ضربه تبدیل می‌کند. امروزه با توجه به اهمیت مفهوم توسعه پایدار، در نظر گرفتن به اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از صنایع مختلف، بسیار حائز اهمیت است. یکی از صنایع بزرگ که در تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای سهم عمده‌ای دارد صنعت تولید سیمان است. مواد مکمل سیمانی (Materials Cementing Supplementary) کاربرد گسترده‌ای در ساخت بتن و ملات‌های سیمانی دارند که به عنوان افزودنی در مخلوط مورد استفاده قرارمی‌گیرند. در سال‌های اخیر استفاده از این مواد با توجه به ویژگی‌هایی همچون مزایای زیست محیطی، کاهش انرژی مصرفی (ناشی از کاهش مصرف سیمان) و تأثیر مشخصات نهایی مصالح در حال افزایش است [1].

میزان تولید بتن به حدود سه میلیارد تن در سال رسیده است و با توجه به افزایش تولید و مصرف این ماده پیش بینی می‌شود میزان تولید آن تا چهار میلیارد تن در سال افزایش یابد. این امر در کشورهایی همچون چین، هند و کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا با شدت بیشتری همراه است. افزایش تولید بتن در جهان چالش‌های متعددی را در صنعت سیمان به وجود آورده که آسیب‌های زیست محیطی، تأمین مواد اولیه و افزایش مصرف انرژی از جملهٔ آنهاست. افزایش کاربرد مواد شبه سیمانی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان می‌تواند تا حدودی اثرات مخرب ناشی از افزایش تولید سیمان را کاهش دهد و همزمان مزایایی را برای مشخصات محصول نهایی افزایش کارپذیری و مقاومت در سنین بالا و بهبود دوام در مقابل محیط‌های مهاجم به همراه داشته باشد. مواد پوزولانی مواد سیلیسی و آلومینی هستند که در مجاورت آب در حرارت معمولی با آهک ترکیب می‌شوند و مواد پایدار و نامحلول (ژل) تشکیل می‌دهند و خاصیت سیمانی شدن دارند. سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی، میکروسیلیس، خاکستربادی از جمله مواد پوزولانی هستند که می‌توانند با بخشی از سیمان جایگزین شده و یک یا چند مشخصه نهایی محصول سیمانی نهایی را تغییر دهند [2,3]. Detwiler و Mehta [4] اثرات شیمیایی و فیزیکی دودهٔ سیلیس را بر رفتار مکانیکی بتن ارزیابی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان دهندهٔ اثر پرکنندگی میکروسیلیس بود. به طوری که این موضوع بر بهبود مشخصات مکانیکی تأثیر مستقیم داشت. با جایگزینی ٪۱۰ این ماده، مقاومت فشاری نسبت به نمونهٔ شاهد افزایش یافت. Rao [5] به مطالعهٔ انقباض درازمدت خشک شدن ملات، نفوذ دودهٔ سیلیس و اندازهٔ سنگدانه ریز پرداخت. در پژوهشی که پیرامون کاربرد میکروسیلیس در کامپوزیت سیمانی به عمل آورد به این نتیجه رسید که استفاده از دودهٔ سیلیس موجب کاهش زمان گیرش اولیهٔ سیمان می‌گردد. با جایگزینی دودهٔ سیلیس به مقدار کم، زمان گیرش اولیه کاهش معناداری را نشان نداد؛ ولی با افزایش درصد جایگزینی زمان

گیرش به شدت کاهش یافت؛ به طوری که در نمونهٔ حاوی ۳۰% دودهٔ سیلیس زمان گیرش اولیه حدود ۳۰ دقیقه گزارش شده است. در حالی که در نمونهٔ بدون دودهٔ سیلیس زمان گیرش اولیه در حدود ۱۴۰ دقیقه بود. مظلوم و همکاران [6] تأثیر میکروسیلیس را بر روی مقاومت فشاری ملات سیمانی بررسی نمودند. آنها دریافتند که با افزودن میکروسیلیس مقاومت فشاری در ۲۸ روز ۲۱٪ افزایش می‌یابد.

Poon و همکاران [7] به بررسی اثر میکروسیلیس در تخلخل ملات سیمانی پرداختند. مطالعات نشان داد که افزودن ۵–۱۰٪ میکروسیلیس باعث کاهش تخلخل ملات سیمانی می‌شود. Sirijaroonchai و همکاران [8] به بررسی اثر اندازهٔ سنگدانه بر خواص مکانیکی و تشکیل ترک الیاف فولادی تغییر شکل یافته HPFRCC پرداختند. محققان برای درک بهتر رفتار سخت شوندگی کرنش کامپوزیت‌های سیمانی حاوی الیاف تحت بارهای فشاری تک‌محوری، دومحوری و سه محوری، آزمایش-هایی انجام دادند. آنها دریافتند که کاربرد الیاف کوتاه‌تر مقاومت و شکل‌پذیری را تحت مسیرهای بارگذاری تک محوری و دومحوری افزایش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که اثرات محصورشدگی به واسطهٔ الیاف در آزمایش‌های فشاری سه محوری اندک است. Kang و همکاران [9] به بررسی اثرات اندازهٔ ذرات سنگدانه‌ها بر رفتار کامپوزیت سیمان الیافی پرداختند. چهار نوع سنگدانه با اندازهٔ ذرات مختلف از طریق طرح اختلاط مشابه حاوی ۲٪ حجمی الیاف قلاب شکل و پیچشی ارزیابی شد. آنها دریافتند مقاومت فشاری در سنگدانه‌های ریزتر به طور قابل توجهی بیشتر بوده است. دهقانی و ناطق الهی [10] تأثیر الیاف پلی ونیل الکل بر مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی را بررسی کردند. آنها دریافتند که کاربرد این نوع الیاف در کامپوزیت سیمانی، مقاومت کششی و خمشی را بهبود می‌بخشد و ظرفیت کرنش را افزایش می‌دهد. این موضوع ناشی از افزایش تعداد ترک‌ها و محدود شدن طول و عرض ترک‌ها به وسیلهٔ الیاف است. Choi و همکاران [11] به مطالعهٔ میزان تأثیر الیاف پلیمری پلی‌اتیلن بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی و سربارهٔ گدازهٔ قلیایی پرداختند. نتایج پژوهش حاکی از آن بود که وجود الیاف در مخلوط سیمانی باعث دست‌یابی به مقادیر بالاتر کرنش کششی و کاهش عرض و فواصل ترک‌ها می‌شود. توکلی‌زاده و همکاران [12] تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری و روند رشد آن را در ملات‌های سیمانی بررسی کردند. آنها دریافتند که با افزایش میکروسیلیس مقدار آب لازم برای رسیدن به غلظت نرمال، روانی متعارف و زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمان افزایش می‌یابد. در صورت استفاده از روان‌کننده در سنین کمتر از هفت روز با افزایش میکروسیلیس، مقاومت و روند رشد آن کاهش می‌یابد؛ زیرا نمونه‌های حاوی مقدار بیشتر سیمان، زودتر به مقاومت نهایی خود می‌رسند. در سنین بیشتر از هفت روز با افزایش میکروسیلیس تا حدود ۱۰٪، مقاومت و روند رشد آن افزایش می‌یابد. اما با افزایش مقدار بیشتر میکروسیلیس مقاومت روند کاهشی را طی می‌کند. نمونه‌های حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس پس از حدود ۱۷ روز، مقاومت فشاری بیشتری در مقایسه با سایر نمونه‌ها نشان می‌دهند. در صورت عدم استفاده از روان‌کننده با افزایش میکروسیلیس، مقاومت نمونه‌های فشاری کاهش می‌یابد. بنابراین استفاده از میکروسیلیس به تنهایی مفید نیست و استفاده از روان‌کننده امری ضروری است.

ثقفی و همکاران [13] به بررسی تعیین آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند پرداختند. آن‌ها از سه نوع الیاف شامل الیاف فولادی قلاب‌دار، الیاف فولادی موج‌دار، الیاف پلی‌پروپیلن، به‌صورت انفرادی و ترکیبی با میزان حجمی ۱/۵٪ در مخلوط ملات ا ستفاده نمودند. نتایج نشان داد که خصوصیات مکانیکی کامپوزیت سیمان الیافی، نسبت به بتن معمولی افزایش معناداری داشت. کاربرد کامپوزیت سیمان الیافی با توجه به عملکرد مناسب در فشار، کشش و برش راهکار مناسبی برای جلوگیری از تراکم آرماتور، کاهش میزان زیاد آرماتورهای عرضی در اتصالات تیر به ستون و افزایش ظرفیت برشی و شکل‌پذیری اعضا محسوب می‌شود.

Kumar و همکاران [14] به تحقیق دربارهٔ اثر استفاده از میکروسیلیس بر خواص بتن در حالت تازه و سخت شده پرداختند. در این پژوهش مقدار درصد جایگزینی میکروسیلیس با سیمان برابر با ۶٪ ، ۷٪ و ۸٪ بوده است. نتایج تحقیق حاکی از بهبود قابل توجه مشخصات مکانیکی بتن حاوی میکروسیلیس در مقایسه با بتن معمولی است به طوری که بهترین مقاومت فشاری در جایگزینی ۸٪ به دست آمده است. Mu و همکاران [15] به مطالعهٔ اثر الیاف فولادی بر مقاومت برشی کامپوزیت سیمانی پرداختند. آنها در پژوهش خود مقاومت، مدول و طاقت برشی را بررسی کردند. نتایج پژوهش حاکی از این بود که استفاده

از الیاف فولادی در درصد حجمی ۰/۸ تا ۲٪ باعث می‌شود که مقاومت، مدول و طاقت برشی به ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد نسبت به نمونهٔ فاقد الیاف بهبود یابد. Moodi و همکاران [16] به بررسی دوام ملات‌های پوزولانی با پایهٔ میکروسیلیس در برابر محیط‌های خورندهٔ اسیدی و کلرایدی پرداختند. هدف از پژوهش ارائهٔ ملاتی مقاوم در برابر هر یک از عوامل اسیدی و کلریدی بوده است. بدین منظور از سه نوع سیمان به همراه ترکیباتی از پوزولان‌های میکروسیلیس و پومیس/تراس استفاده کرده‌اند تا ۱۰ طرح اختلاط ساخته شود. آزمایش‌های صورت گرفته شامل کلی (مقاومت فشاری، جذب آب مویینه و جذب آب حجمی)، آزمایش‌های تعیین عملکرد در محیط کلرایدی (مقاومت الکتریکی سطحی و مهاجرت تسریع یافتهٔ یون‌های کلرایدی) و آزمایش‌های کنترل عملکرد در محیط اسیدی (کاهش مقاومت فشاری و کاهش وزن) بود. نتایج بدست آمده تا سن ۲۴۰ روزه حاکی از آن است که ترکیب ۵٪ میکروسیلیس و ۸٪ تراس در سیمان سرباره‌ای طرح اختلاط مناسبی برای ملات در برابر محیط‌های مهاجم اسیدی و کلرایدی به حساب می‌آید. افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش ضریب مهاجرت یون‌های کلرایدی به ترتیب تا ۴ و ۵ برابر نمونه شاهد، گواهی بر این ادعاست. همچنین استفاده از ۱۰٪ پومیس به جای پوزولان تراس در طرح مذکور نیز عملکرد قابل‌قبولی ارائه می‌کند. ثقفی و همکاران [17] به بررسی رفتار کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند پرداخته‌اند. آن‌ها با مطالعات آزمایشگاهی، رفتار کششی، فشاری و خمشی نمونه‌های ساخته شده از کامپوزیت‌های الیافی را بررسی کردند. آنها در این آزمایش‌ها ۵ نمونهٔ مختلف از کامپوزیت سیمانی الیافی با ۳ نوع الیاف متفاوت را به‌صورت انفرادی و ترکیبی با میزان حجمی ۱/۵٪ حجم بتن در مخلوط ملات به کار بردند و به ارزیابی رفتار سخت‌شوندگی کرنش و مقایسه با بتن معمولی پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف بین ۵ تا ۸ برابر مقاومت کششی و کرنش نهایی بین ۷۰ تا ۱۰۰ برابر کرنش نهایی نمونهٔ فاقد الیاف افزایش یافته است. عامل طاقت حاصل از آزمایش خمش نمونه‌های حاوی الیاف بین ۵ تا ۹ برابر طاقت نمونهٔ فاقد الیاف محاسبه شده است. همچنین متوسط مقاومت فشاری و کرنش نهایی نمونه‌های حاوی الیاف به ترتیب ۱/۸۳ و ۲/۹۴ برابر مقاومت فشاری و کرنش نهایی نمونهٔ فاقد الیاف به دست آمده است.

Mermerdaş و همکاران [18] اثرات ترکیبی میکروسیلیس، الیاف فولادی و سنگدانهٔ سبک مصنوعی را بر انقباض و عملکرد مکانیکی کامپوزیت سیمانی با مقاومت بالا مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی خود از الیاف میکرو فولاد با طول 6mm با درصدهای حجمی ۰٪ ، ۱٪ و ۲٪ بهره گرفتند. آن‌ها از میکروسیلیس با درصدهای وزنی ۰٪ و ۲۵٪ استفاده کردند. آنها خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی را از نظر مقاومت فشاری، خمشی و مدول الاستیسیته ارزیابی نمودند. علاوه بر این آزمایش‌های جذب آب و موئینگی برای ساختار منافذ و نفوذپذیری انجام دادند. مقادیر خشک‌شدگی و جمع‌شدگی در طول دورهٔ خشک‌شدن ۶۰ روزه تعیین شده است. بنابراین اثرات الیاف، افزودن میکروسیلیس و سنگدانهٔ سبک وزن مصنوعی بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش حجم الیاف فولاد، خصوصیات مکانیکی کامپوزیت سیمانی و رفتار جمع‌شدگی بهبود یافته است. وجود میکروسیلیس اثرات منفی سنگدانهٔ سبک وزن مصنوعی را تا حدی از بین می‌برد. کهنی و همکاران [19] تأثیر استفادهٔ توأم از میکا و فلدسپات به عنوان جایگزین سیمان در مخلوط ملات خودتراکم را مورد بررسی قرار دادند. آنها از میکا و فلدسپات با درصدهای مختلف وزنی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در طرح اختلاط استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزایش درصد جایگزینی مواد معدنی میکا و فلدسپات با سیمان، باعث کاهش مقاومت فشاری در هر دو گروه طرح اختلاط با نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۳ و ۰/۴ می‌شود. آنها پی بردند که استفاده از میکا و فلدسپات در طرح ملات خودتراکم، باعث کاهش ۲۹٪ جذب آب، در بهترین حالت می‌شود. با توجه به تصاویر SEM، در نمونهٔ شاهد ماتریس گستردهٔ سیمانی با تنوع کریستالی بالا دیده می‌شود. این امر به دلیل وجود آهک مازاد در شکل‌گیری کریستال‌های اترینگایت درون ژل C-S-H است.

Ganesh و Muthukanna [۲۰] اثرات الیاف فولادی و میکروسیلیس بر روی خواص مکانیکی و شکست بتن ژئوپلیمر با عملکرد بالا را مورد بررسی قرار دادند. چهار حجم الیاف فولاد (۰٪ ، ۱٪ ، ۲٪ و ۳٪) و چهار درصد حجمی میکرو سیلیس (۵٪ ، ۱۰٪ ، ۲۰٪ و ۳۰٪) در مخلوط استفاده شده است. در این پژوهش خواص مکانیکی و شکست ارزیابی شده است. نتایج

نشان داد که میکروسیلیس تأثیر پیچیده‌ای بر کارایی و خواص سخت شده بتن ژئوپلیمری دارد؛ به طوری که نمونه‌ها با ۲۰٪ و ۳۰٪ میکروسیلیس دارای ویژگی مکانیکی برتر نسبت به ۵٪ میکروسیلیس هستند. اگرچه افزایش درصد الیاف فولادی به کاهش کارایی منجر می‌شود؛ اما بهبود مستمر عملکرد مکانیکی و شکست بتن ژئوپلیمری را به همراه دارد. دالوند و احمدی [21] به مطالعهٔ مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم تقویت شده با الیاف فولادی حاوی میکروسیلیس پرداختند. آنها در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از الیاف فولادی با درصدهای حجمی ۰/۲۵ ، ۰/۵ ، ۰/۷۵ و ۱ و از میکروسیلیس با درصد وزنی ۵٪ و ۱۵٪ استفاده نمودند. در مجموع آنها ۱۵ طرح اختلاط را آزمایش کردند. آنها دریافتند که چقرمگی و رفتار پس از شکست کامپوزیت‌های سیمانی به وسیلهٔ اثر پل‌زدن الیاف بهبود می‌یابد و مقاومت پیوند منطقهٔ انتقال سطح بین دانه‌های ریز میکروسیلیس و خمیر سیمان به سبب بالابردن درصد میکروسیلیس افزایش می‌یابد.

Nanditha و Saikumar [22] به مطالعهٔ خصوصیات مکانیکی بتن تقویت شده با الیاف فولادی و حاوی میکروسیلیس پرداختند. آنها خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها را با و بدون الیاف مقایسه نمودند. آزمونه‌های تهیه شده از بتن ردهٔ ۵۰ مگاپاسکال و نسبت-های مختلف الیاف فولادی اضافه شده ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪، ۲٪ و ۲/۵٪ بوده است. دودهٔ سیلیس با ۸٪ حجم سیمان در هر مخلوط جایگزین شده است. نتایج تحقیق مزایای ترویج الیاف فولادی در ساخت‌وساز را نشان می‌دهد.

Singh [23] به مطالعهٔ اثر توأم میکروسیلیس و الیاف فولادی بر ویژگی‌های مقاومتی و دوام ملات سیمانی پرداخت. او در این پژوهش براساس تحلیل آزمایشگاهی ویژگی‌های مقاومت و دوام نمونه‌های آزمایشگاهی را ارزیابی کرد. مطالعات سایر محققان نشان داده است که میکروسیلیس خاصیت سیمانی شدن دارد و سبب افزایش تراکم ماتریس سیمانی و بهبود خواص مکانیکی و دوامی بتن می‌شود. سینغ نتیجه گرفت که استفاده از الیاف فولادی تا ۸۲٪ نسبت به نمونه شاهد بهبود یافته است. مطالعهٔ پیشینهٔ تحقیق موضوع نشان می‌دهد که دودهٔ سیلیس، فلدسپات و الیاف فلزی کوتاه دارای پتانسیل‌های ویژه‌ای در راستای بهبود مشخصات خاصی از کامپوزیت‌های سیمانی است. هر کدام از مواد مذکور به دلیل ویژگی‌های ذاتی تنها بر روی برخی از خصوصیات کامپوزیت‌های سیمانی تأثیرگذاری قابل توجهی دارند؛ در حالی که استفاده توأمان آنها می‌تواند چندین ویژگی کامپوزیت‌های سیمانی را به صورت همزمان ارتقا بخشد. از سویی بررسی نویسندگان این مقاله حاکی از عدم وجود پژوهشی جامع و مدون در خصوص تأثیر دودهٔ سیلیس و فلدسپات و الیاف فلزی کوتاه بر خصوصیات مختلف کامپوزیت سیمانی بود. لذا در پژوهش حاضر هدف بررسی اثر توأمان دودهٔ سیلیس، فلدسپات و الیاف فلزی کوتاه بر مشخصات مکانیکی و دوام کامپوزیت سیمانی در نظر گرفنه شد تا چندین ویژگی عملکردی کامپوزیت-های سیمانی به صورت همزمان مطالعه شود. هدف از این آزمایش‌ها، ساخت کامپوزیت سیمانی الیافی دارای دوام و خواص مکانیکی قابل توجه است. نوآوری این پژوهش ارائه یک طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی الیافی با اصلاح طرح مخلوط موجود در مرجع [24] است. به این منظور به جای سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی از الیاف فلزی کوتاه و به جای خاکستر بادی از فلدسپات که ارزان‌تر و در دسترس‌تر بود، استفاده شد. در این طرح برای کاهش مقدار سیمان، علاوه بر دودهٔ سیلیس از الیاف فلزی کوتاه که دوام مطلوبی به نمونه‌ها می‌دهد، به صورت مجزا و ترکیبی با دودهٔ سیلیس استفاده گردید. در نهایت برای انتخاب بهترین طرح مخلوط مقاومت‌های فشاری، خمشی، کششی به روش مستقیم، درصد جذب آب اولیه و نهایی، مقاومت الکتریکی و بررسی ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی این کامپوزیت سیمانی مورد مطالعه قرار گرفت.

مشخصات مصالح مصرفی

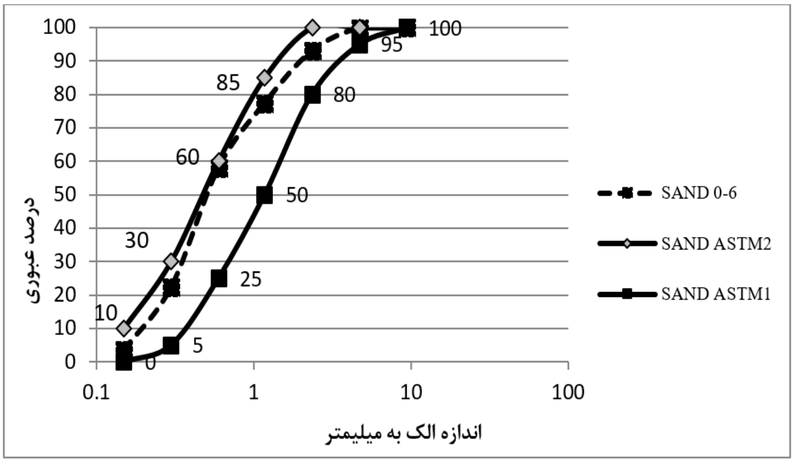
در پژوهش حاضر اجزای اصلی تشکیل دهندهٔ نمونه‌های آزمایشگاهی سنگدانه، سیمان و آب است. برای دست‌یابی به اهداف از پیش تعیین شده، از میکروسیلیس و فلدسپات با درصدهای وزنی مختلف به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در مخلوط سیمانی استفاده شده است.

سنگدانه

سنگدانهٔ مصرفی در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی شامل ریزدانه (اندازهٔ اسمی کوچکتر از ۴/۷۵ mm) است که با عنوان ماسه صفر- شش شناخته می‌شود. تودهٔ ویژهٔ ماسه مصرفی در حالت اشباع با سطح خشک برابر ۲۶۱۱ Kg/m^3، جذب آب آن ۲/۴٪ است. ماسهٔ مصرفی از کارخانهٔ لوله سازی شمال شهر رشت تهیه شد. دانه‌بندی ماسهٔ مصرفی مطابق استاندارد ASTM C33 [25] است که دانه‌بندی آن در نمودار شکل (۱) و جدول (۱) ارائه شده است.

سیمان

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان هگمتان استفاده شده است. مشخصات شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی در جدول (۲) و (۳) آمده است.



شکل ۱ منحنی دانه‌بندی ماسهٔ مصرفی

جدول ۱ دانه‌بندی ماسهٔ مصرفی

اندازه الک	۱۵۰ μm	۳۰۰ μm	۶۰۰ μm	۱/۱۸ Mm	۲/۳۶ Mm	۴/۷۵ Mm	۹/۵ Mm	۱۲/۵ Mm	۱۹ Mm
ماسه	۳/۴۴	۲۲/۳۲	۵۸	۷۷/۳۵	۹۲/۹۶	۹۹/۹۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۲ مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی (www.hegmatancement.com)

ترکیب	LOI	TiO_2	SO_3	Na_2O	K_2O	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
درصد تشکیل دهنده	۲/۰۴	–	۲/۳۲	۰/۴۷	۰/۶۹	۱/۴۸	۶۲/۸۵	۳/۸۳	۴/۸۱	۲۱/۳۲

جدول ۳ مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی (www.hegmatancement.com)

نوع سیمان	وزن مخصوص $\frac{gr}{cm^3}$	سطح مخصوص $\frac{gr}{cm^2}$	گیرش اولیه (Min)	گیرش نهایی(Min)	انبساط اتوکلاو (٪)
هگمتان تیپ ۲	۳/۱۵	۲۹۱۰	۱۵۰	۲۰۵	۰/۰۷

جدول ۴ ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس مصرفی (www.Iran-ifc.com)

ترکیب	LOI	SO_3	MgO	C_aO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
درصد تشکیل دهنده	۳/۵۰	۵/۰۰	۲/۰۰	۱/۵۰	۲/۰۰	۱/۰۰	۸۵/۰۰

معرفی مواد جایگزین سیمان

در پژوهش حاضر از دو مادهٔ فلدسپات و میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان به صورت انفرادی و ترکیبی استفاده شده است. این مواد به صورت انفرادی با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ و به شکل ترکیبی با ۱۵٪ وزن سیمان با آن جایگزین شده‌اند. امروزه از میکروسیلیس به عنوان یکی از مواد افزودنی به عنوان جایگزین سیمان (با خاصیت پوزولانی) استفاده می‌شود. این ماده در رنگ‌های سفید و خاکستری عرضه می‌شود که معمولاً رنگ آن از خاکستری کم‌رنگ تا خاکستری پررنگ متغیر است. رنگ میکروسیلیس بسته به منشاء و نحوهٔ تولید آن متفاوت است. این محصول قابل اشتعال نیست. افزودن این ماده به مخلوط سیمانی باعث کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش دوام کامپوزیت سیمانی می‌شود. در پژوهش حاضر میکروسیلیس مصرفی تولید کارخانهٔ فروسیلیس ایران است که دارای وزن مخصوص ۲۲۰۰ $\frac{Kg}{m^3}$ است. این افزودنی بدون حل‌کردن در آب به حالت خشک و به صورت درصدی از وزن سیمان به مخلوط اضافه شده است. جدول (۴) مشخصات میکروسیلیس مصرفی را نشان می‌دهد.

الیاف

در پژوهش حاضر برای بررسی اثر الیاف در کامپوزیت‌های سیمانی حاوی میکروسیلیس و فلدسپات از الیاف فولادی با درصد حجمی ۱٪ استفاده شده است. الیاف فولادی مصرفی از نوع کوتاه و با طول تقریبی ۱/۳ cm است. جدول (۵) مشخصات الیاف فولادی مصرفی را نشان می‌دهد.

جدول ۵ مشخصات الیاف فولادی

قطر / طول	مقاومت کششی (MPa)	قطر (mm)	طول (mm)	سطح مقطع
۶۵	۱۲۰۰-۸۰۰	۰/۲	۱۳	گرد

آب

کیفیت آب از آن جهت مهم شمرده می‌شود که ناخالصی‌های موجود در آن ممکن است در گیرش سیمان تأثیر گذاشته و اختلالاتی به وجود آورد. در بیشتر استانداردها آب مناسب برای ملات و بتن آب آشامیدنی است. در این پژوهش برای ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها، از آب شرب شهر رشت استفاده شده است که معیارهای توصیه شده در ASTM C1602 [26] را رعایت می‌کند.

فوق روان‌کننده

کاربرد افزودنی‌هایی همچون میکروسیلیس و فلدسپات بر کارایی کامپوزیت سیمانی اثر منفی دارند و سبب کاهش کارایی ملات می‌شود. از این رو در این پژوهش برای دست‌یابی به کارایی و روانی مطلوب و کاهش اثر منفی مواد افزودنی بر روانی کامپوزیت سیمانی در ساخت مخلوط‌های سیمانی از فوق‌روان کننده استفاده شده است. فوق روان‌کننده مصرفی بر پایه پلی-کربوکسیلات اتر و با نام تجاری FARCO PLAST P10 محصول شرکت شیمی ساختمان است. جدول (۶) مشخصات فوق روان-کننده را نشان می‌دهد.

جدول ۶ مشخصات فوق روان‌کننده مصرفی

مشخصات فنی	
ترکیب شیمیایی	کوپلیمرهای اصلاح شده پلی
طبیعت یونی	آنیونی
رنگ	سبز تیره
حالت فیزیکی	مایع
وزن مخصوص	۰/۰۲ ± ۱/۱ در ۲۰°c
کلراید (PPM)	حداکثر ۵۰۰

ساخت نمونه های آزمایشگاهی

در این پژوهش ۱۹ طرح اختلاط از کامپوزیت سیمانی حاوی میکروسیلیس، فلدسپات و الیاف فولادی ساخته شده است. طرح شاهد فاقد مواد افزودنی است. سایر طرح‌های اختلاط در حالت کلی به دو گروه حاوی و فاقد الیاف تقسیم می‌شوند. نسبت آب به مواد سیمانی برای تمامی طرح‌ها مقداری ثابت و برابر با ۰/۳ درنظر گرفته شده است. جزئیات مربوط به طرح اختلاط نمونه-های آزمایشگاهی در جدول (۷) و معرفی طرح اختلاط در جدول (۸) آمده است.

جدول ۷ جزئیات طرح اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی

No	Name	Cement	Feldspar	silicafume	Steel Fiber	Water	W/C	River Sand	Super Plastisizer
		Kg/m³	%(c)	%(c)	%(V)	Kg/m³		Kg/m³	%
۱	Ctrl	۷۰۰	۰	۰	۰	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵
۲	F۵	۶۶۵	۵	۰	۰	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵
۳	F۱۰	۶۳۰	۱۰	۰	۰	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۴۵
۴	F۱۵	۵۹۵	۱۵	۰	۰	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۴۵
۵	S۵	۶۶۵	۰	۵	۰	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵
۶	S۱۰	۶۳۰	۰	۱۰	۰	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵۵
۷	S۱۵	۵۹۵	۰	۱۵	۰	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۶
۸	F۵S۵	۶۳۰	۵	۵	۰	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵
۹	F۵S۱۰	۵۹۵	۵	۱۰	۰	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵۵
۱۰	F۱۰S۵	۵۹۵	۱۰	۵	۰	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵
۱۱	F۵S	۶۶۵	۵	۰	۱	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵۵
۱۲	F۱۰S	۶۳۰	۱۰	۰	۱	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵
۱۳	F۱۵S	۵۹۵	۱۵	۰	۱	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵
۱۴	S۵S	۶۶۵	۰	۵	۱	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵۵
۱۵	S۱۰S	۶۳۰	۰	۱۰	۱	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۶۵
۱۶	S۱۵S	۵۹۵	۰	۱۵	۱	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۶۵
۱۷	F۵S۵S	۶۳۰	۵	۵	۱	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵۵
۱۸	F۵S۱۰S	۵۹۵	۵	۱۰	۱	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۶
۱۹	F۱۰SF۵S	۵۹۵	۱۰	۵	۱	۲۱۰	۰/۳	۱۵۰۱	۰/۵۵

جدول ۸ معرفی طرح اختلاط

شماره	نام طرح	معرفی طرح اختلاط
۱	Ctrl	نمونه شاهد (فاقد فلدسپات، دوده سیلیس و الیاف)
۲	F۵	حاوی ۵ درصد فلدسپات به عنوان جایگزین سیمان
۳	F۱۰	حاوی ۱۰ درصد فلدسپات به عنوان جایگزین سیمان
۴	F۱۵	حاوی ۱۵ درصد فلدسپات به عنوان جایگزین سیمان
۵	S۵	حاوی ۵ درصد دوده سیلیس به عنوان جایگزین سیمان
۶	S۱۰	حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیس به عنوان جایگزین سیمان
۷	S۱۵	حاوی ۱۵ درصد دوده سیلیس به عنوان جایگزین سیمان
۸	F۵S۵	حاوی ترکیب فلدسپات و دوده سیلیس با جایگزینی ۱۰٪
۹	F۵S۱۰	حاوی ترکیب فلدسپات و دوده سیلیس با جایگزینی ۱۵٪ (۵٪ فلدسپات و ۱۰٪ دوده سیلیس)
۱۰	F۱۰S۵	حاوی ترکیب فلدسپات و دوده سیلیس با جایگزینی ۱۵٪ (۱۰٪ فلدسپات و ۵٪ دوده سیلیس)
۱۱	F۵S	حاوی ۵ درصد فلدسپات به عنوان جایگزین سیمان و ۱٪ الیاف فولادی
۱۲	F۱۰S	حاوی ۱۰ درصد فلدسپات به عنوان جایگزین سیمان و ۱٪ الیاف فولادی
۱۳	F۱۵S	حاوی ۱۵ درصد فلدسپات به عنوان جایگزین سیمان و ۱٪ الیاف فولادی
۱۴	S۵S	حاوی ۵ درصد دوده سیلیس به عنوان جایگزین سیمان و ۱٪ الیاف فولادی
۱۵	S۱۰S	حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیس به عنوان جایگزین سیمان و ۱٪ الیاف فولادی

ادامه جدول ۸ معرفی طرح اختلاط

۱۶	S۱۵S	حاوی ۱۵ درصد دوده سیلیس به عنوان جایگزین سیمان و ۱٪ الیاف فولادی
۱۷	F۵S۵S	حاوی ترکیب فلدسپات و دوده سیلیس با جایگزینی ۱۰٪ و ۱٪ الیاف فولادی
۱۸	F۵S۱۰S	حاوی ترکیب فلدسپات و دوده سیلیس با جایگزینی ۱۵٪ (۵٪ فلدسپات و ۱۰٪ دوده سیلیس) و ۱٪ الیاف فولادی
۱۹	F۱۰SF۵S	حاوی ترکیب فلدسپات و دوده سیلیس با جایگزینی ۱۵٪ (۱۰٪ فلدسپات و ۵٪ دوده سیلیس) و ۱٪ الیاف فولادی

انجام آزمایشات

آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری یکی از پارامترهای مهم در بررسی خواص مکانیکی محسوب می‌شود. در این پژوهش آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C109 [27] و پس از عمل‌آوری تا سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده است. نمونه‌های عمل‌آوری شده تا سن ۲۸ روز پس از قرارگیری در کوره با دمای ۶۰۰°C تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. نحوهٔ قرارگیری و شکست نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰mm در دستگاه آزمایش مقاومت فشاری در شکل (۲ آمده است. در این آزمایش نیروی فشاری به وسیلهٔ جک فشاری تا لحظهٔ ایجاد شکست در نمونه وارد می‌شود. در این لحظه بارگذاری متوقف شده و نتیجه ثبت می‌گردد. مطابق رابطهٔ (۱) از تقسیم حداکثر نیروی فشاری (نیروی ثبت شده در لحظهٔ شکست) بر سطح مقطع نمونهٔ مکعبی ($۲۵۰۰mm^2$) مقاومت فشاری کامپوزیت سیمانی به دست می‌آید.

$$f = \frac{P}{A} \quad (۱)$$



شکل ۲ شکست نمونهٔ مکعبی در آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت خمشی

مقدار مقاومت بتن در برابر خم‌شدن قبل از ترک‌خوردن یا شکستن مقاومت خمشی توصیف می‌شود. این عامل یکی از مشخصه‌های مهم کامپوزیت‌های سیمانی حاوی الیاف به شمار می‌آید. در این آزمایش نیروی فشاری در وسط دهانه تیر با ابعاد mm ۱۶۰×۴۰×۴۰ تا لحظهٔ ایجاد اولین ترک وارد می‌شود. در این لحظه با توقف بارگذاری از طریق رابطهٔ (۲) مقاومت خمشی نمونهٔ آزمایشگاهی محاسبه می‌گردد. آزمایش مقاومت خمشی را می‌توان با استفاده از دو روش بارگذاری سه نقطه‌ای و بار مرکزی انجام داد، در این پژوهش از روش بارگذاری مرکزی بر اساس استاندارد ASTM C293-94 [28] استفاده شده است. برای انجام این آزمایش نمونه‌های آزمایشگاهی تا سن ۲۸ روز عمل‌آوری شده‌اند.

$$S_f = \frac{3pl}{2bh^2} \quad (۲)$$

در رابطهٔ فوق S_f مقاومت خمشی نمونهٔ آزمایشگاهی بر حسب مگاپاسکال و P ماکزیمم نیروی اعمالی در وسط دهانه بر حسب نیوتن در لحظهٔ ایجاد اولین ترک و b عرض مقطع تیر (نمونهٔ آزمایشگاهی) برابر ۴۰mm است. h ارتفاع مقطع (۴۰mm) و ۱ فاصلهٔ بین دو تکیه‌گاه برابر ۱۴۰mm است. نحوهٔ انجام قرار-گیری نمونه داخل دستگاه و بارگذاری برای آزمایش مقاومت خمشی به روش بار متمرکز نقطه‌ای در شکل (۳) آمده است.



شکل ۳ شکست کامپوزیت سیمانی حاوی الیاف فولادی در آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت کشش به روش مستقیم

آزمایش کشش مستقیم برای همهٔ نمونه‌های آزمایشگاهی پس از عمل‌آوری آنها تا سن ۲۸ روز انجام شده است. برای انجام این آزمایش از نمونه‌های بریکت (Briquette) استفاده شد. طول تقریبی این نمونه‌ها ۳ اینچ (تقریبا mm ۷۶) و ضخامت آن‌ها mm ۲۵ است. دستگاه مربوط به این آزمایش دارای دو فک است که نمونهٔ بتنی پس از قرارگیری در دستگاه مربوط به این آزمایش تحت اثر نیروی کشش مستقیم تا لحظهٔ شکست قرار می‌گیرد. این آزمایش بر اساس استاندارد AASHTO T132 (American (Association of State Highway and Transportation Officials [29] انجام شده است. برای محاسبهٔ مقاومت کششی لازم است تا نیروی ماکزیمم کششی بر سطح مقطع قسمت میانی نمونه با مساحت mm^2 ۶۲۵ تقسیم شود. نحوهٔ قرارگیری نمونهٔ بریکت در دستگاه آزمایش کشش مستقیم در شکل (۴) آمده است.



شکل ۴ شکست نمونهٔ بریکت در آزمایش کشش مستقیم

آزمایش جذب آب اولیه و نهایی

جذب آب به عنوان یکی از شاخص‌های مهم مشخص کنندهٔ دوام ملات سیمانی به حساب می‌آید. جذب آب نمونه‌های مورد آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C642 [30] برای نمونه‌های مکعبی انجام شده است. برای انجام این آزمایش نمونه‌ها تا سن ۲۸ روز در دمای ۲۶°C اتاق داخل حوضچهٔ آب برای عمل‌آوری قرار داشتند. آزمایش جذب آب در دو حالت جذب آب اولیه (نیم‌ساعته) و جذب آب نهایی (۷۲ ساعته) انجام شده است. شکل ۵ توزین نمونه‌ها در آزمایش جذب آب و شکل (۶) قرارگیری نمونه‌ها در اون برای آزمایش جذب آب نشان می‌دهد.



شکل ۵ توزین نمونه‌ها در آزمایش جذب آب



شکل ۶ قرارگیری نمونه‌ها در اون برای آزمایش جذب آب

آزمایش مقاومت الکتریکی

در این پژوهش آزمایش مقاومت الکتریکی بر اساس استاندارد ASTM C1202 [31] انجام شده است. شکل (۷) آزمایش مقاومت الکتریکی را نشان می‌دهد. الکتریکی برای انجام این آزمایش نمونه‌های مکعبی با ابعاد mm ۵۰ را پس از عمل‌آوری در سن ۲۸ روز، از آب خارج‌کرده و پس از خشک نمودن سطوح نمونهٔ بتنی، مقاومت الکتریکی با صفحات مسی و مقداری خمیر تازه سیمان اندازه‌گیری می‌شود. برای آن که اتصال کامل صورت گیرد مقداری از خمیر سیمان بین صفحات مسی و سطح نمونه‌ها زده می‌شود. در روند آزمایش از جریان متناوب استفاده می‌شود و دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با ایجاد فرکانس‌های مختلف، مقاومت الکتریکی نمونهٔ بتنی را اندازه‌گیری می‌کند. با داشتن مقاومت الکتریکی حاصل از عبور جریان الکتریسیته، سطح بتن و فاصلهٔ بین دو صفحهٔ فلزی مقاومت الکتریکی از طریق رابطهٔ (۳) به دست می‌آید:

$$\rho = R\frac{A}{L} \qquad (۳)$$

R: مقاومت الکتریکی نشان داده شده توسط اهم‌متر

A: مساحت مقطع بتن (صفحه مسی) برحسب متر مربع

L: فاصله دو صفحه مسی برحسب متر

ρ: مقاومت الکتریکی ویژه بر حسب اهم در متر



شکل ۷ آزمایش مقاومت الکتریکی

بررسی ریزساختار میکروسکوپ الکترونی (SEM)

میکروسـکوپ الکترونی روبشـی یا SEM نوعی میکروسـکوپ الکترونی است که قابلیت عکس‌برداری از سطوح با بزرگنمایی ۱۰ تا ۵۰۰۰۰۰ برابر با قدرت تفکیکی کمتر از ۱ تا ۲۰ نانومتر را دارد. این میکروسکوپ از مناسب‌ترین وسایل در دسترس برای آزمایش و آنالیز مورفولوژی نانو ساختارها و شناسایی ترکیبات شیمیائی است [32]. در این پژوهش برای بررسی ریز ساختار نمونه‌های آزمایشگاهی و مشاهدات میکرو سکوپی از تصاویر SEM با بزرگنمایی تا ۵۰ هزار برابر استفاده گردید. ریز ساختار طرح شـماره ۱۹ حاوی ۱۰٪ فلدسـپات و ۵٪ میکروسـیلیس در حالت حرارت ندیده و حرارت دیده بررسی شده است.

نتایج و بحث

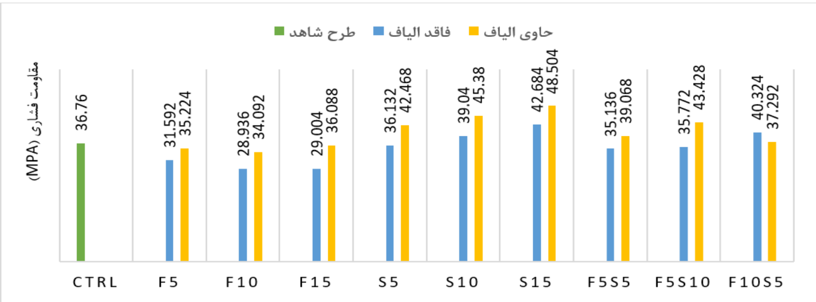
نتایج آزمایش مقاومت فشاری

برای انجام این آزمایش از نمونه های مکعبی با ابعاد mm ۵۰×۵۰×۵۰ اسـتفاده شـد. این آزمایش برای تمامی نمونه‌ها پس از عمل‌آوری تا سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شده است. نتایج به دست آمده از این آزمایش برای سنین مختلف عمل‌آوری در جدول (۹) ارائه شده است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری پس از عمل‌آوری تا سن ۷ روز برای طرح شاهد و سایر طرح‌های حاوی میکروسـیلیس، فلدسـپات در حالت با و بدون الیاف، در نمودار شکل (۸) آمده است. نتایج نشان می‌دهد در هر دو گروه طرح فاقد الیاف و حاوی ۱٪ الیاف فولادی، افزایش درصـــد جایگزینی میکرو سیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری در سن ۷ روز شده است.

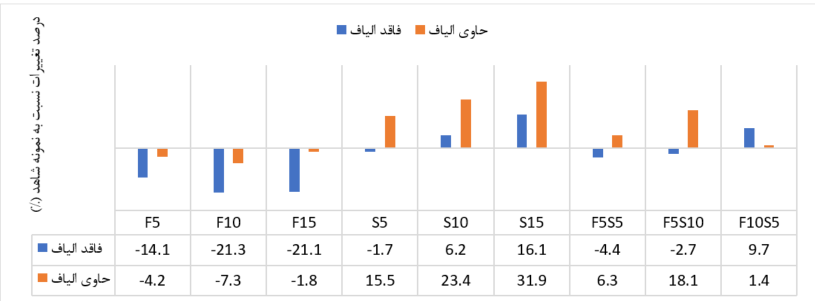
جدول ۹ نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

شماره	نام طرح	فشاری ۷ روزه (MPa)	فشاری ۲۸ روزه (MPa)	فشاری ۹۰ روزه (MPa)
۱	Ctrl	۳۶/۷۶	۳۹/۵۰	۴۹/۹۹
۲	F۵	۳۱/۵۹	۳۸/۵۸	۴۸/۱۴
۳	F۱۰	۲۸/۹۴	۳۸/۹۲	۴۵/۹۱
۴	F۱۵	۲۹/۰۰	۳۴/۹۰	۴۷/۷۰
۵	S۵	۳۶/۱۳	۵۰/۱۰	۶۳/۹۳
۶	S۱۰	۳۹/۰۴	۵۷/۱۹	۶۴/۹۴
۷	S۱۵	۴۲/۶۸	۶۶/۵۱	۷۰/۰۵
۸	F۵S۵	۳۵/۱۴	۵۷/۶۱	۶۲/۴۹
۹	F۵S۱۰	۳۵/۷۷	۶۱/۷۱	۶۳/۱۴
۱۰	F۱۰S۵	۴۰/۳۲	۶۵/۱۶	۶۷/۰۸
۱۱	F۵S	۳۵/۲۲	۵۵/۹۹	۵۹/۶۷
۱۲	F۱۰S	۳۴/۰۹	۵۳/۱۱	۵۹/۲۲
۱۳	F۱۵S	۳۶/۰۹	۵۶/۰۶	۶۲/۸۴
۱۴	S۵S	۴۲/۴۷	۶۹/۹۶	۷۲/۶۲
۱۵	S۱۰S	۴۵/۳۸	۷۷/۱۳	۷۷/۳۴
۱۶	S۱۵S	۴۸/۵۰	۷۵/۳۴	۷۷/۶۳
۱۷	F۵S۵S	۳۹/۰۷	۶۷/۲۳	۷۰/۲۹
۱۸	F۵S۱۰S	۴۳/۴۳	۶۸/۷۰	۷۴/۴۷
۱۹	F۱۰S۵S	۳۷/۲۹	۵۷/۷۵	۶۵/۶۸

این موضوع ناشی از تأثیر میکروسیلیس بر بهبود ریزساختار کامپوزیت سیمانی و افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه است. در میان طرح‌های حاوی الیاف و نمونه‌های حاوی ترکیب میکروسیلیس و فلدسپات بهترین نتیجه به طرح حاوی ترکیب ۵٪ فلدسپات و ۱۰٪ میکروسیلیس اختصاص داشت. شکل (۸) نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۷ روز نشان می‌دهد. در نمودار شکل (۹) نتایج مقاومت فشاری در سن ۷ روز نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و فلدسپات با طرح شاهد مقایسه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد در هر دو گروه طرح حاوی و فاقد الیاف، جایگزینی فلدسپات با بخشی از سیمان باعث کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونهٔ شاهد شده است هرچند وجود الیاف فولادی تا حدی از اثر منفی فلدسپات بر مقاومت فشاری ۷ روزه کاسته است؛ در نمونه‌های با جایگزینی فقط میکروسیلیس افزایش درصد جایگزینی این ماده باعث بهبود مقاومت فشاری ۷ روزه می‌گردد؛ به طوری که در جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس با سیمان، مقاومت فشاری ۷ روزه برای طرح‌های فاقد الیاف و حاوی الیاف به ترتیب ۱۶/۱٪ و ۳۱/۹٪ نسبت به نمونهٔ شاهد افزایش یافته است. در نمودار شکل (۱۰) مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز برای طرح شاهد و سایر طرح‌های حاوی میکروسیلیس و فلدسپات در حالت با و بدون الیاف ارائه شده است.

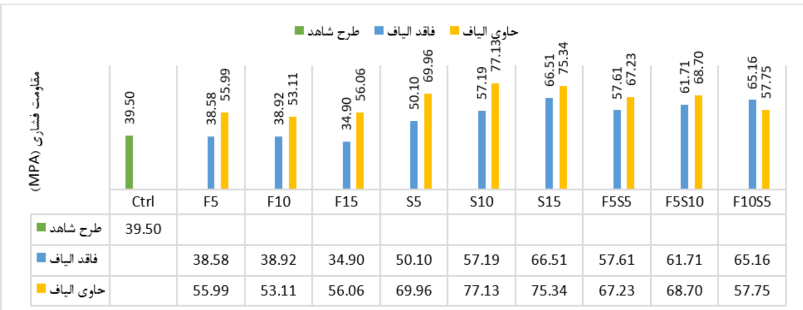


شکل ۸ نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۷ روز



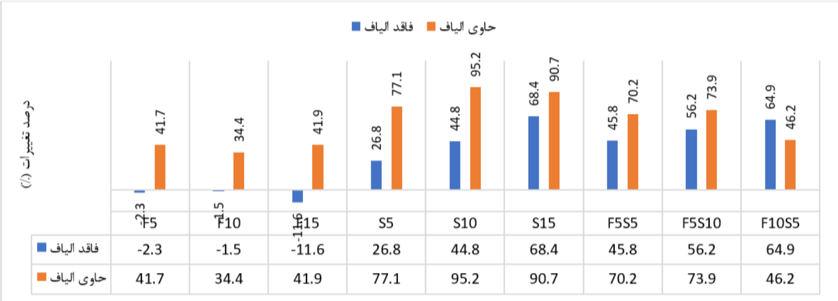
	F5	F10	F15	S5	S10	S15	F5S5	F5S10	F10S5
فاقد الیاف	-14.1	-21.3	-21.1	-1.7	6.2	16.1	-4.4	-2.7	9.7
حاوی الیاف	-4.2	-7.3	-1.8	15.5	23.4	31.9	6.3	18.1	1.4

شکل ۹ مقایسهٔ نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و فلدسپات با طرح شاهد



	Ctrl	F5	F10	F15	S5	S10	S15	F5S5	F5S10	F10S5
طرح شاهد	39.50									
فاقد الیاف		38.58	38.92	34.90	50.10	57.19	66.51	57.61	61.71	65.16
حاوی الیاف		55.99	53.11	56.06	69.96	77.13	75.34	67.23	68.70	57.75

شکل ۱۰ نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز

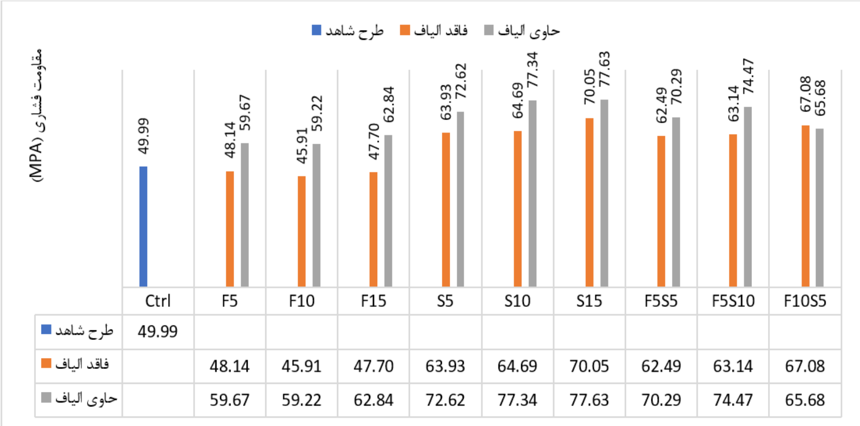


شکل ۱۱ مقایسهٔ نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و فلدسپات با طرح شاهد

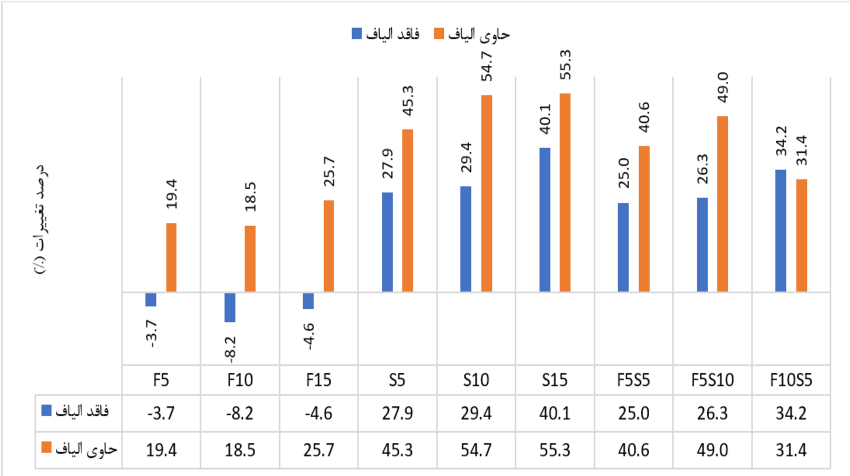
بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزایش سن عمل‌آوری تا ۲۸ روز باعث شده نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نتایج مطلوبی به دست آورند. بهترین نتیجه در میان طرح‌های فاقد الیاف به طرح با جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس اختصاص دارد. با افزایش جایگزینی ۱۵٪ فلدسپات در میان نمونه‌های فاقد الیاف، کمترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه مشاهده شد.

نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه کامپوزیت‌های سیمانی حاوی میکروسیلیس و فلدسپات در حالت با و بدون الیاف در نمودار شکل (۱۱) با نتایج مربوط به طرح شاهد مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد در همهٔ نمونه‌های با جایگزینی فلدسپات به صورت انفرادی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه کمتری نسبت به نمونهٔ شاهد مشاهده شد. وجود الیاف در این نمونه‌ها باعث بهبود مقاومت فشاری شده است؛ به طوری که تمام نمونه‌های الیافی نسبت به شاهد افزایش مقاومت داشته‌اند. در میان نمونه‌های با جایگزینی فقط میکروسیلیس، تمام نمونه‌ها در هر دو حالت با و بدون الیاف فولادی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بالاتری نسبت به شاهد کسب کرده‌اند. در میان نمونه‌های فاقد الیاف بهترین عملکرد مختص نمونه طرح با جایگزینی ۱۵٪ است که نسبت به طرح شاهد ۶۸/۴٪ افزایش داشته است. در میان طرح‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی، بهترین نتیجه برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه به طرح با جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس مربوط است که نسبت به طرح شاهد، ۹۵/۲٪ مقاومت بیشتری نتیجه داده است. در میان نمونه‌های حاوی ترکیب فلدسپات و میکروسیلیس که از الیاف استفاده نشده، کاربرد ترکیب ۱۰٪ فلدسپات و ۵٪ میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان، موجب دست‌یابی به بهترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه شده است به گونه‌ای که حدود ۶۵٪ مقاومت بالاتری نسبت به نمونهٔ شاهد نتیجه داده است.

با توجه به نمودار شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود که در میان نمونه‌های عمل‌آوری شده تا سن ۹۰ روز بهترین عملکرد مقاومت فشاری در میان هر دو گروه نمونه‌های حاوی و فاقد الیاف مربوط به طرح با جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس است، به طوری که در حالت فاقد الیاف ۴۰/۱٪ و در حالت حاوی الیاف ۵۵/۳٪ مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه شاهد نتیجه داده است. اگرچه با افزایش سن عمل‌آوری تا ۹۰ روز مقاومت فشاری افزایش یافته؛ اما همچنان مقاومت فشاری نمونه‌های با جایگزینی فقط فلدسپات (در تمام درصدهای جایگزینی) نسبت به طرح شاهد کمتر است. وجود الیاف فولادی تا حد زیادی اثر منفی جایگزینی فلدسپات را جبران نموده و باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونهٔ شاهد شده است؛ به طوری که در جایگزینی ۱۵٪ فلدسپات استفاده از ۱٪ الیاف فولادی باعث بهبود ۲۵/۷٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونهٔ شاهد شده است. نتایج مربوط به نمونه‌های با جایگزینی فقط میکروسیلیس نشان می‌دهد که افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس باعث بهبود مقاومت فشاری ۹۰ روزه در هر دو گروه طرح حاوی و فاقد الیاف می‌شود، این موضوع ناشی از واکنش پوزلانی میکروسیلیس در سنین بالا (۹۰ روز) و تأثیر آن بر بهبود ریز ساختار و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری است. در میان کامپوزیت‌های سیمانی حاوی الیاف فولادی و ترکیب میکروسیلیس و فلدسپات بهترین عملکرد برای مقاومت فشاری ۹۰ روزه در جایگزینی ترکیب ۵٪ فلدسپات و ۱۰٪ میکروسیلیس با سیمان به دست آمده و ۴۹٪ مقاومت بالاتری نسبت به نمونهٔ شاهد نتیجه داده است، این موضوع نشان می‌دهد در جایگزینی ترکیب ۵٪ فلدسپات و ۱۰٪ میکروسیلیس، بهترین توزیع الیاف فولادی در مخلوط کامپوزیت سیمانی اتفاق افتاده و باعث دست‌یابی به بهترین مقاومت فشاری در میان نمونه‌های حاوی ترکیب فلدسپات و میکروسیلیس شده است.



شکل ۱۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۹۰ روزه



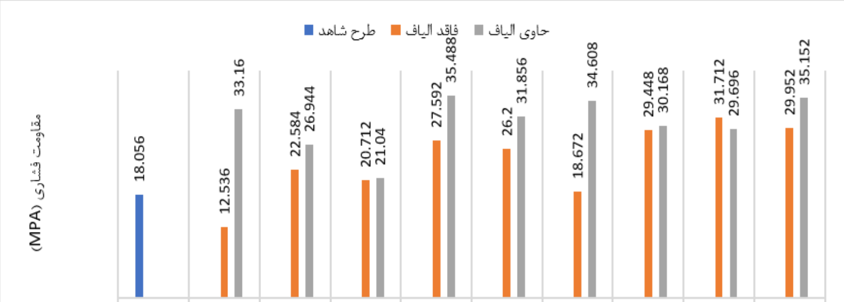
شکل ۱۳ مقایسه نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و فلدسپات با طرح شاهد

نتایج مقاومت فشاری حرارتی

با هدف بررسی اثر حرارت بر نتایج آزمایش مقاومت فشاری، تمام نمونه‌های آزمایشگاهی پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز در کوره با دمای ۶۰۰°C قرار گرفتند و پس از سردشدن تدریجی در دمای محیط، آزمایش مقاومت فشاری بر روی آنها انجام گرفت. نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های حرارت دیده در شکل (۱۴) ارائه شده است.

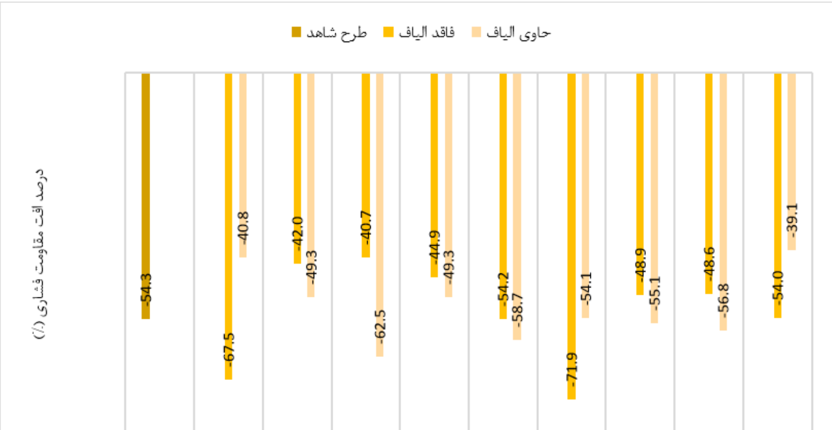
بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری پس از قرارگرفتن نمونه‌ها تحت اثر دمای ۶۰۰°C نشان می‌دهد که به جز طرح حاوی ۵٪ فلدسپات، سایر نمونه‌ها مقاومت فشاری حرارتی بالاتری نسبت به نمونهٔ شاهد نتیجه داده‌اند. نمودار شکل (۱۵) میزان افت مقاومت فشاری را پس از قرارگرفتن در معرض حرارت نشان می‌دهد. در این نمودار میزان افت مقاومت فشاری هر نمونه تحت اثر حرارت، نسبت به حالت حرارت ندیده، بر حسب درصد ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد میزان افت مقاومت در نمونهٔ شاهد ۵۴/۳ درصد است. در میان طرح‌های فاقد الیاف فولادی، نمونه‌های با جایگزینی ۱۰٪ و ۱۵٪ فلدسپات و نمونه‌های با جایگزینی ۵٪ و ۱۰٪ میکروسیلیس نسبت به طرح شاهد، افت مقاومت کمتری تحت دمای بالا داشته‌اند. افزایش دما تا ۶۰۰°C تغییرات شیمیایی و فیزیکی بسیاری را در نمونه‌ها ایجاد می‌کند. در این دما آب حفره‌ای، جذبی و بین لایه‌ای از ساختار کامپوزیت سیمانی خارج می‌شود و فرآیند دی هیدراسیون اتفاق می‌افتد. تبخیر و خروج آب از ساختار ملات، باعث ایجاد انقباض حرارتی و در نتیجه به وجود آمدن میکروترک‌ها در ساختار کامپوزیت سیمانی می‌شود که این موضوع باعث افت مقاومت خواهد شد. در میان نمونه‌های فاقد

الیاف کمترین میزان افت مقاومت فشاری بر اثر حرارت به طرح با جایگزینی ۱۵٪ فلدسپات اختصاص دارد. در این گروه از نمونه‌ها افزایش درصد جایگزینی فلدسپات باعث کاهش میزان افت مقاومت فشاری بر اثر حرارت شده است. در میان نمونه‌های فاقد الیاف و با جایگزینی میکروسیلیس به صورت انفرادی، کمترین افت مقاومت بر اثر حرارت برای طرح با جایگزینی ۵٪ میکروسیلیس به دست آمده است در این گروه از نمونه‌های آزمایشگاهی افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس سبب افزایش افت مقاومت تحت اثر حرارت شده است. بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری حرارتی در نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی، حاکی از آن است که وجود الیاف بر نتایج تأثیر چشمگیری دارد؛ به طوری که تمامی نمونه‌های حاوی فلدسپات و میکروسیلیس (به صورت انفرادی و ترکیبی) نسبت به نمونهٔ شاهد، مقاومت فشاری حرارتی بالاتری داشته‌اند. وجود الیاف فولادی باعث شده میزان افت مقاومت تحت تأثیر دمای بالا در برخی نمونه‌ها تا حدودی کاهش یابد. برای مثال در طرح با جایگزینی ۵٪ فلدسپات، وجود الیاف فولادی موجب شده میزان افت مقاومت فشاری از ۶۷/۵٪ به ۴۰/۸٪ کاهش یابد. این موضوع در مورد طرح با جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس نیز صدق می‌کند؛ به طوری که به سبب وجود الیاف میزان افت مقاومت فشاری بر اثر حرارت در این نمونه از ۷۲٪ به ۵۴٪ کاهش داشت.



	Ctrl	F5	F10	F15	S5	S10	S15	F5S5	F5S10	F10S5
طرح شاهد	18.056									
فاقد الیاف		12.536	22.584	20.712	27.592	26.2	18.672	29.448	31.712	29.952
حاوی الیاف		33.16	26.944	21.04	35.488	31.856	34.608	30.168	29.696	35.152

شکل ۱۴ نتایج آزمایش مقاومت فشاری پس از قرارگیری تحت دمای ۶۰۰°C



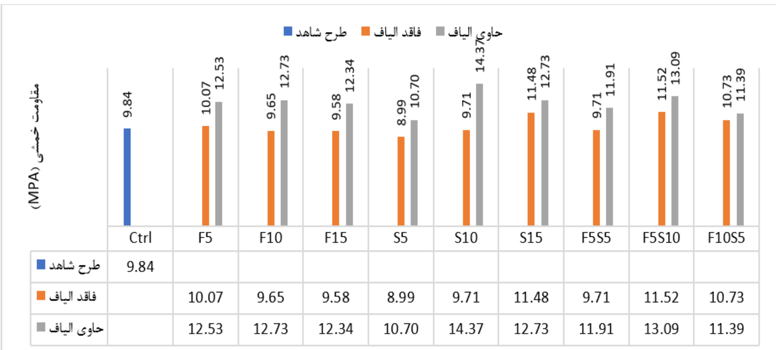
	Ctrl	F5	F10	F15	S5	S10	S15	F5S5	F5S10	F10S5
طرح شاهد	-54.3									
فاقد الیاف		-67.5	-42.0	-40.7	-44.9	-54.2	-71.9	-48.9	-48.6	-54.0
حاوی الیاف		-40.8	-49.3	-62.5	-49.3	-58.7	-54.1	-55.1	-56.8	-39.1

شکل ۱۵ میزان افت مقاومت فشاری در اثر قرارگیری در معرض حرارت

نتایج آزمایش مقاومت خمشی

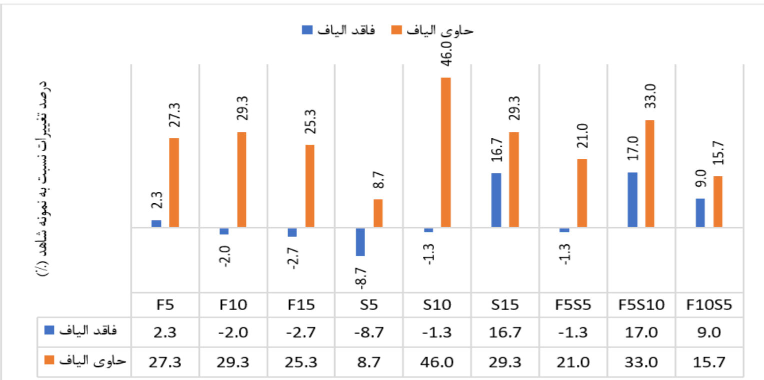
این آزمایش برای همهٔ نمونه‌ها پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز انجام شده است. در این آزمایش از نمونه‌های مکعب مستطیلی با ابعاد mm ۴۰×۴۰×۱۶۰ استفاده شد. نتایج این آزمایش در شکل (۱۶) آمده است.

نتایج آزمایش مقاومت خمشی نشان می‌دهد که وجود الیاف بر بهبود مقاومت خمشی اثر مستقیم دارد؛ به طوری که همهٔ نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی بدون توجه به درصد جایگزینی فلدسپات و میکروسیلیس، مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونهٔ شاهد داشته‌اند. نمونهٔ فاقد الیاف (F5) و حاوی فلدسپات افزایش مقاومت خمشی اندکی نسبت به نمونهٔ شاهد نشان می‌دهد. تغییر درصد جایگزینی این ماده هرچند باعث کاهش مقاومت خمشی کامپوزیت سیمانی شده؛ اما مقدار این کاهش بسیار ناچیز است. نتایج مربوط به نمونه‌های فاقد الیاف و با جایگزینی میکروسیلیس به صورت انفرادی نشان می‌دهد که افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس بهبود مقاومت خمشی را به دنبال دارد. برای مثال نمونه با جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس نسبت به نمونه با جایگزینی ۵٪ به مقدار ۲۷/۷٪ مقاومت خمشی بالاتری نتیجه داده است. در میان طرح‌های حاوی فلدسپات و میکروسیلیس به صورت ترکیبی در هر دو حالت با و بدون الیاف بهترین عملکرد خمشی مربوط به طرح با جایگزینی ترکیب ۵٪ فلدسپات و ۱۰٪ میکروسیلیس مربوط است. این طرح نسبت به نمونه شاهد ۱۷٪ مقاومت خمشی بالاتری داشت. میزان تغییرات مقاومت خمشی کامپوزیت‌های سیمانی حاوی فلدسپات و میکروسیلیس در هر دو حالت با و بدون الیاف، نسبت به نمونه شاهد بر حسب درصد در نمودار شکل (۱۷) آمده است. در میان نمونه‌های حاوی الیاف، بهترین عملکرد به طرح با جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس اختصاص دارد. این طرح ۴۶٪ مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونهٔ شاهد نتیجه داد. افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس تا ۱۵٪ اثر منفی بر مقاومت خمشی داشته و باعث کاهش مقاومت خمشی کامپوزیت سیمانی می‌شود. در میان نمونه‌های الیافی با جایگزینی فلدسپات نیز بهترین نتیجهٔ مقاومت خمشی در جایگزینی ۵٪ فلدسپات به دست آمد که نسبت به نمونهٔ شاهد ۳۳٪ مقاومت خمشی بالاتری نتیجه داده است، افزایش درصد جایگزینی فلدسپات همانند میکروسیلیس موجب کاهش مقاومت خمشی شده است.



	Ctrl	F5	F10	F15	S5	S10	S15	F5S5	F5S10	F10S5
طرح شاهد	9.84									
فاقد الیاف		10.07	9.65	9.58	8.99	9.71	11.48	9.71	11.52	10.73
حاوی الیاف		12.53	12.73	12.34	10.70	14.37	12.73	11.91	13.09	11.39

شکل ۱۶ نتایج آزمایش مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز



	F5	F10	F15	S5	S10	S15	F5S5	F5S10	F10S5
فاقد الیاف	2.3	-2.0	-2.7	-8.7	-1.3	16.7	-1.3	17.0	9.0
حاوی الیاف	27.3	29.3	25.3	8.7	46.0	29.3	21.0	33.0	15.7

شکل ۱۷ مقدار تغییرات مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد بر حسب درصد

طاقت خمشی یکی از پارامترهای مهم است که با آزمایش مقاومت خمشی به دست می‌آید. طاقت عبارت است از مقدار انرژی که نمونهٔ بتنی در اثر نیروهای ضربه‌ای می‌تواند قبل از گسیختگی کامل تحمل کند. این پارامتر با استفاده از سطح زیر نمودار بار- تغییر شکل در آزمایش خمش یا فشار به دست می آید و با ضریبی به نام ضریب طاقت بتن مشخص می شود. در این پژوهش با استفاده از نتایج آزمایش خمش، ضریب طاقت خمشی بر اساس استاندارد ASTM C1609 [33] در دو حالت برای نمونه‌های حرارت دیده و نمونه‌های حرارت ندیده محاسبه شده است. بدین منظور پس از رسم منحنی نیرو-جابجایی سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی زمانی که تغییر شکل در امتداد یا وسط دهانه به ۱/۱۵۰ طول نمونه می‌رسد، محاسبه می شود. با استفاده از رابطهٔ (۴) میزان طاقت خمشی محاسبه شده است. این پارامتر فقط برای نمونه‌های حاوی الیاف کاربرد دارد. از این رو این پارامتر برای نمونهٔ شاهد و سایر نمونه‌های فاقد الیاف محاسبه نشده است.

$$T_{D150} = \frac{\left(\frac{P\times L}{150}\right)}{2} \qquad (۳)$$

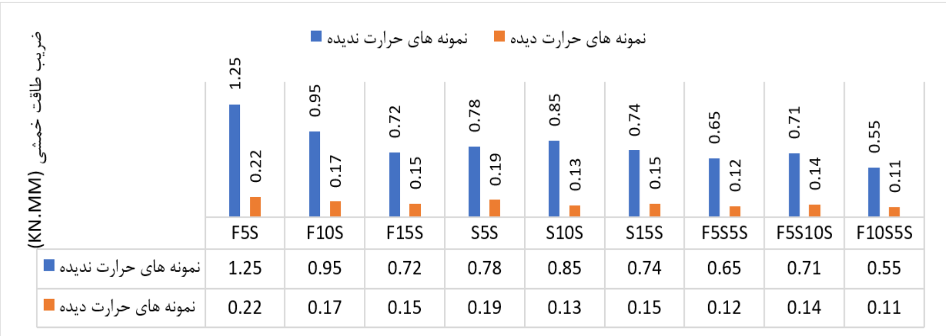
P: بار متناظر با طول $\frac{L}{150}$ بر حسب KN

L: طول نمونه آزمایشگاهی (۱۶۰mm)

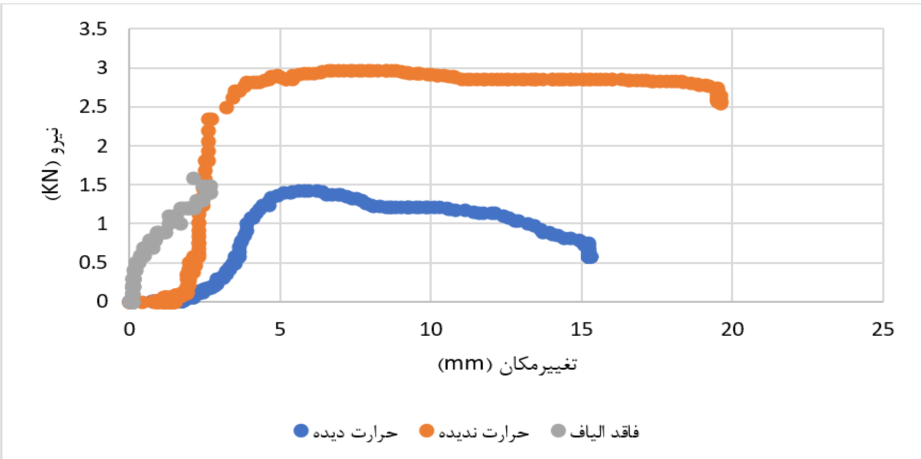
T_{D150}: طاقت خمشی بر حسب $\frac{KN}{mm}$

نمودار شکل (۱۸) نتایج مربوط به ضریب طاقت خمشی نمونه‌ها را در دو حالت حرارت دیده و حرارت ندیده نشان می‌دهد.

حرارت بر کاهش طاقت خمشی نمونه‌ها تأثیر چشمگیری دارد؛ به طوری که قرارگرفتن نمونه تحت اثر دمای ۶۰۰°C باعث شده ضریب طاقت خمشی به طور متوسط ۸۰/۶٪ کاهش یابد. در میان نمونه‌های حرارت ندیده بیشترین مقدار ضریب طاقت خمشی به طرح با جایگزینی ۵٪ فلدسپات مربوط است.



شکل ۱۸ طاقت خمشی نمونه‌ها در دو حالت حرارت دیده و حرارت ندیده



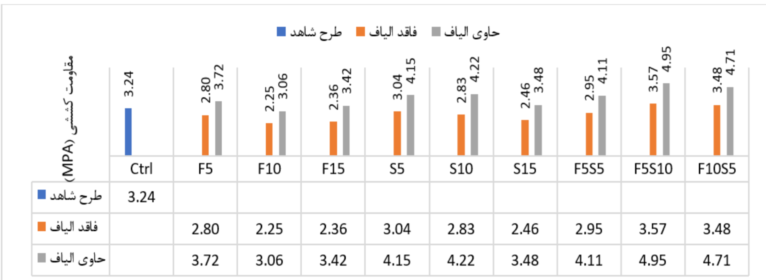
شکل ۱۹ منحنی نیروی تغییرمکان نمونهٔ حاوی ۱٪ الیاف فولادی و ۵٪ فلدسپات

در نمونه‌های حاوی فلدسپات به صورت انفرادی، افزایش درصد جایگزینی این ماده باعث کاهش طاقت خمشی شده است. در میان نمونه‌های حاوی میکروسیلیس بیشترین مقدار طاقت خمشی در جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس به دست آمد. منحنی نیروی تغییر مکان برای نمونهٔ حاوی ۵٪ فلدسپات به عنوان نمونه‌ای که بیشترین مقدار ضریب طاقت خمشی را نتیجه داده در شکل (۱۹) رسم شده است. بررسی منحنی نیروی تغییر مکان نشان می‌دهد قرارگرفتن در معرض دمای ۶۰۰°C باعث کاهش چشمگیر سطح زیر منحنی و میزان جذب انرژی می‌شود. این منحنی به خوبی قابلیت پل‌زدن الیاف فولادی بر روی ریز ترک‌ها و در نتیجه بهبود رفتار ملات بعد از ایجاد اولین ترک را نشان می‌دهد. وجود الیاف در مخلوط باعث شده سطح زیر منحنی افزایش یافته و شکست ترد در نمونه اتفاق نمی‌افتد.

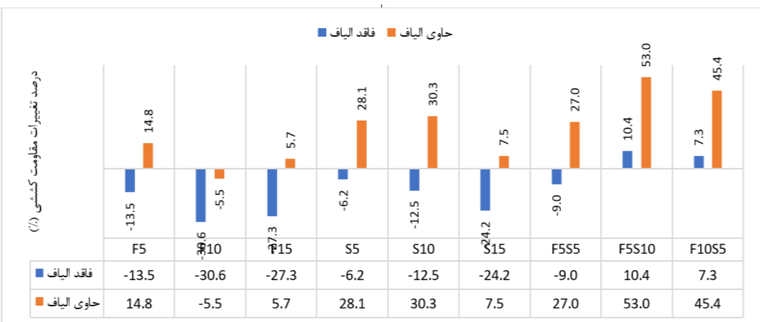
نتایج آزمایش مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی مستقیم مطابق استاندارد AASHTO T132 [29] بر روی نمونه‌های بریکت (Briquette Tensile Test) پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل (۲۰) آمده است.

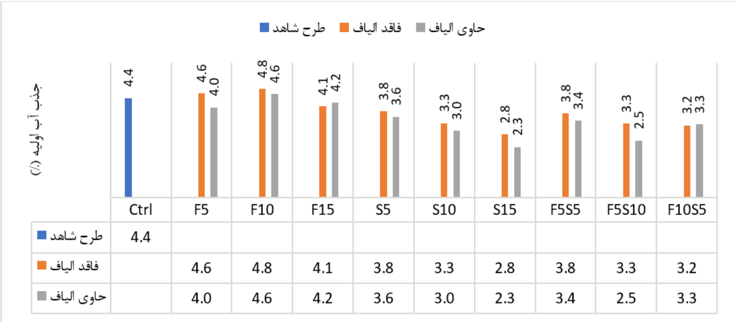
بررسی نتایج آزمایش کشش مستقیم تأثیر چشمگیر الیاف فولادی را بر افزایش مقاومت کششی کامپوزیت‌های سیمانی حاوی میکروسیلیس و فلدسپات نشان می‌دهد. استفاده از ۱٪ الیاف فولادی کوتاه، باعث شده مقاومت کششی به طور متوسط ۳۹٪ افزایش یابد. بیشترین افزایش مقاومت کششی بر اثر وجود الیاف به طرح با جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس مربوط است. به طوری که استفاده از ۱٪ الیاف فولادی در این طرح سبب رشد ۴۹٪ مقاومت کششی شد. بررسی نتایج آزمون کشش مستقیم نمونه‌های با جایگزینی فقط فلدسپات نشان می‌دهد بهترین نتیجه در هر دو حالت با و بدون الیاف در جایگزینی ۵٪ به دست آمده است. در نمونه‌های فاقد الیاف و با جایگزینی فقط میکروسیلیس افزایش درصد جایگزینی این ماده، اثر منفی بر مقاومت کششی دارد. نتایج مقاومت کششی کامپوزیت‌های سیمانی حاوی فلدسپات و میکروسیلیس در حالت با و بدون الیاف فولادی، با نتایج مربوط به نمونهٔ شاهد مقایسه شد. میزان تغییرات بر حسب درصد در نمودار شکل (۲۱) آمده است. براساس نتایج به جز طرح با جایگزینی ۱۰٪ فلدسپات سایر طرح‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی نسبت به نمونهٔ شاهد، مقاومت کششی بالاتری را نتیجه دادند؛ به طوری که بهترین عملکرد به طرح‌های با جایگزینی ۱۵٪ ترکیب فلدسپات و میکروسیلیس اختصاص داشت. در میان طرح‌های فاقد الیاف بهترین عملکرد به طرح‌های حاوی ترکیب فلدسپات و میکروسیلیس و با جایگزینی ۱۵٪ مربوط است. در میان طرح‌های فاقد الیاف، تنها این دو طرح نسبت به نمونهٔ شاهد مقاومت کششی بالاتری داشتند.



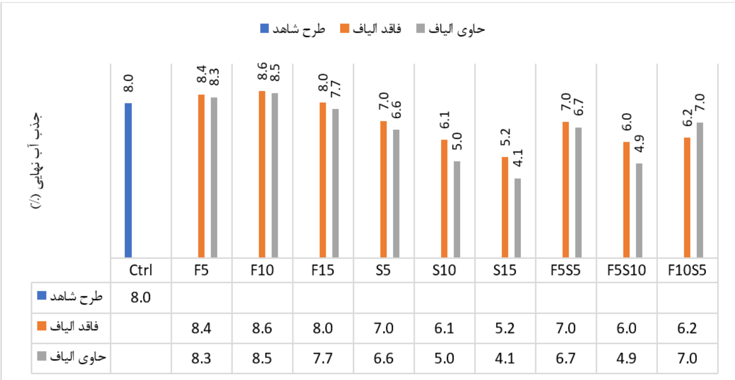
شکل ۲۰ نتایج آزمایش کشش مستقیم ۲۸ روزه



شکل ۲۱ مقدار تغییرات مقاومت کششی نسبت به نمونهٔ شاهد بر حسب درصد



شکل ۲۲ نتایج آزمایش جذب آب اولیه



شکل ۲۳ نتایج آزمایش جذب آب نهایی

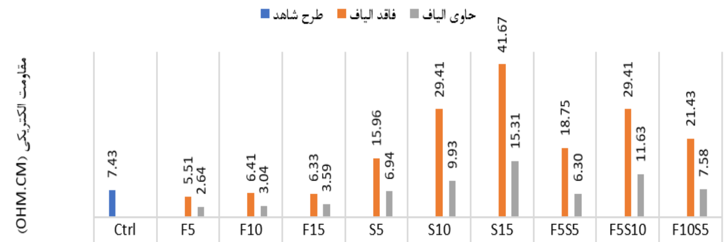
نتایج آزمایش جذب آب

آزمایش جذب آب در دو حالت اولیه و نهایی برای تمامی نمونه‌ها پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز انجام شده است. نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی در شکل (۲۲) و (۲۳) آمده است.

نتایج آزمایش جذب آب اولیه نشان می‌دهد جایگزینی ۵ و ۱۰ در صد فلد سپات با سیمان، باعث افزایش جذب آب در هر دو حالت اولیه و نهایی نسبت به نمونهٔ شاهد می‌شود هرچند وجود الیاف در این دو طرح باعث کاهش جذب آب شده اما همچنان نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی و با جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد فلدسپات جذب آب نهایی بالاتری را نسبت به نمونهٔ شاهد نتیجه دادند. در میان نمونه های با جایگزینی فقط فلدسپات بهترین عملکرد برای جذب آب اولیه و نهایی به طرح با جایگزینی ۱۵٪ مربوط است. این طرح نسبت به نمونهٔ شاهد جذب آب اولیه و نهایی کمتری نتیجه داده است. در طرح‌های با جایگزینی میکروسیلیس به صورت انفرادی، افزایش درصد جایگزینی این ماده با پرکردن حفرات بسیار ریز در ساختار کامپوزیت سیمانی، کاهش جذب آب اولیه و نهایی را به دنبال داشت. کمترین میزان جذب آب در میان همهٔ نمونه‌ها به طرح با جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس مربوط است. استفاده از ۱٪ حجمی الیاف فولادی باعث کاهش جذب آب در این گروه از طرح‌ها شده است. در نمونه‌های حاوی ترکیب فلدسپات و میکروسیلیس بهترین نتایج آزمایش جذب آب به طرح با جایگزینی ۱۵٪ و حاوی ۵٪ فلدسپات و ۱۰٪ میکروسیلیس اختصاص دارد.

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی با هدف بررسی ریزساختار ملات انجام می‌شود. با توجه به ارتباط مستقیمی که میان ریزساختار و دوام مصالح سیمانی وجود دارد با استفاده از نتایج این آزمایش می‌توان دوام کامپوزیت‌های سیمانی را به طور غیرمستقیم ارزیابی کرد. در این پژوهش آزمایش مقاومت الکتریکی برای نمونه‌های مکعبی با ابعاد mm ۵۰×۵۰× ۵۰ پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز انجام شده است. نتایج بدست آمده از این آزمایش در شکل (۲۴) آمده است.



	Ctrl	F5	F10	F15	S5	S10	S15	F5S5	F5S10	F10S5
طرح شاهد	7.43									
فاقد الیاف		5.51	6.41	6.33	15.96	29.41	41.67	18.75	29.41	21.43
حاوی الیاف		2.64	3.04	3.59	6.94	9.93	15.31	6.30	11.63	7.58

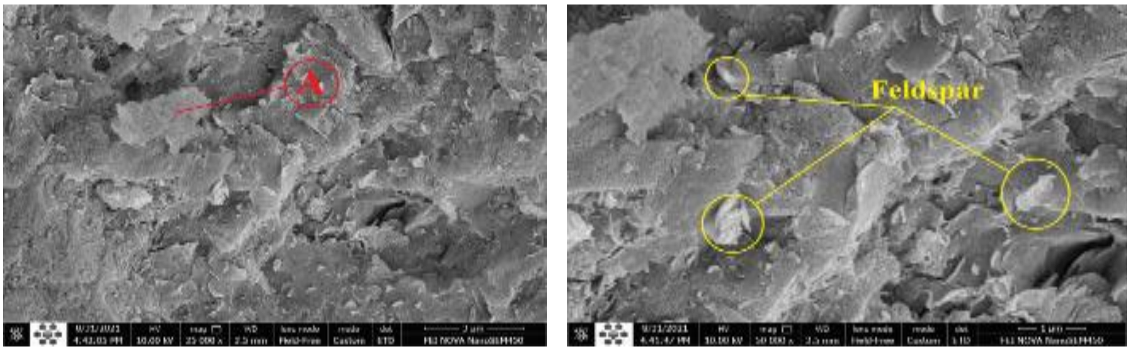
شکل ۲۴ نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

در این آزمایش هرچه عدد حاصل شده برای مقاومت الکتریکی، بالاتر باشد نشان دهندهٔ نفوذپذیری کمتر است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۲۴) نمونهٔ شاهد در مقایسه با نمونه‌های با جایگزینی فلدسپات به صورت انفرادی مقادیر بالاتر مقاومت الکتریکی را نتیجه داد که نشان دهندهٔ ساختار متراکم‌تر نمونهٔ شاهد نسبت به این نمونه‌ها است. کاربرد میکروسیلیس در مخلوط کامپوزیت سیمانی تا حد زیادی باعث افزایش نتایج مقاومت الکتریکی شده است. این موضوع در جایگزینی ۱۵٪ در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و فلدسپات به صورت ترکیبی مشاهده می‌شود. جایگزینی این مواد با درصدهای وزنی ۱۰٪ و ۱۵٪ با سیمان، سبب افزایش نتایج مقاومت الکتریکی شده است. هرچند نتایج نشان دهنده اثر بیشتر میکروسیلیس در مقایسه با فلدسپات، بر افزایش مقاومت الکتریکی است نتایج نشان می‌دهد که میکروسیلیس در مقایسه با فلدسپات، تأثیر بیشتری بر افزایش مقاومت الکتریکی دارد؛ به طوری که درصدهای جایگزینی ۱۵٪، نمونهٔ حاوی مقادیر بیشتر میکروسیلیس ۱۰٪، مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به نمونهٔ مشابه حاوی فلدسپات نتیجه داده است، این موضوع تأثیر چشمگیر میکروسیلیس را بر بهبود ساختار کامپوزیت سیمانی بیان می‌کند. بسطامی و همکاران [24] در پژوهشی با عنوان بررسی آزمایشگاهی اثرات افزودن پوزولان و سرباره بر خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم پرداختند. آنها دریافتند با توجه به نتیجه حاصل از آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک می‌توان گفت ریزدانه بودن مصالح سنگی به سبب فضای خالی اندک بین مصالح باعث افزایش سرعت امواج می‌شود؛ به طوری که در طرح اختلاط دارای میکروسیلیس مقدار سرعت امواج و مقاومت فشاری افزایش پیدا کرد که نشان دهندهٔ تخلخل خوب این طرح اختلاط بود. در طرح اختلاط دارای خاکستر بادی مقدار سرعت امواج مقدار کمی افزایش یافت که با توجه به سایر نتایج مقاومت انجام گرفته شده بر روی نمونه‌ها می‌توان گفت این ماده فقط بر روی تخلخل تأثیر مثبت داشته که باعث افزایش سرعت امواج آلتراسونیک شد.

نتایج ریزساختار میکروسکوپ الکترونی (SEM)

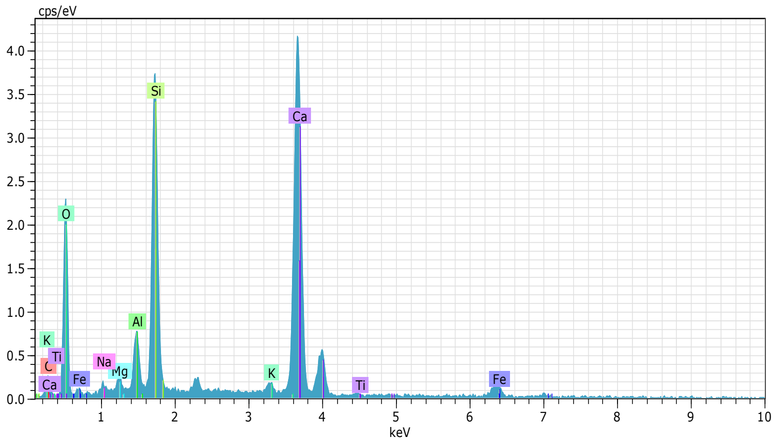
در شکل (۲۵–الف) ریزساختار طرح ۱۹ حاوی ۱۰٪ فلدسپات و ۵٪ میکروسیلیس در حالت حرارت ندیده با بزرگ‌نمایی ۵۰KX مشاهده می‌شود. ساختار نمونه بسیار متراکم بوده است و در بخش‌های مختلف ساختار با وجود مقادیر بالای میکروسیلیس و فلدسپات ساختار یکپارچه‌ای شکل گرفته است و ذرات واکنش نداده بسیار کم ملاحظه می‌گردد. در شکل برخی از ذرات فلدسپات با ساختار ورقه‌ای که به صورت نیمه واکنش داده شده وجود دارند قابل تشخیص است. باتوجه به تخلخل بسیار کم در اطراف این ذرات می‌توان واکنش و ترکیب بسیار مناسب فلدسپات با خمیره را نتیجه گرفت.

بخش مشخص شدهٔ A در شکل (۲۵–ب) مورد آنالیز EDS قرار گرفته است که نتایج آن در شکل (۲۶) و جدول (۱۰) نشان داده شده است. شکل ظاهری و درصد بالای عناصر کلسیم و سیلیس بیانگر تشکیل ساختار C-S-H در محل مورد نظر است. در شکل (۲۶) ساختارهای ورقه‌ای و لایه‌ای ذرات فلدسپات مشاهده می‌شود.



(ب) (الف)

شکل ۲۵ ریزساختار طرح۱۹ حاوی ۱۰٪ فلدسپات و ۵٪ میکروسیلیس در حالت حرارت ندیده



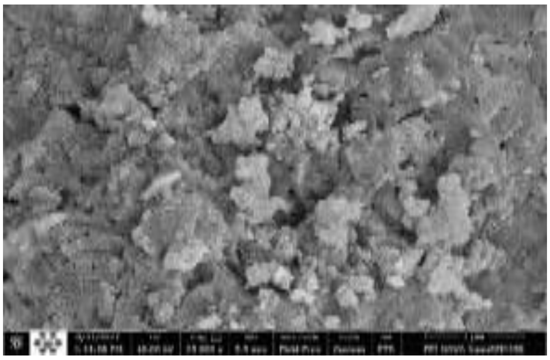
شکل ۲۶ آنالیز EDS طرح ۱۹ حاوی ۱۰٪ فلدسپات و ۵٪ میکروسیلیس در حالت حرارت ندیده

جدول ۱۰ نتایج آنالیز EDS طرح ۱۹ حاوی ۱۰٪ فلدسپات و ۵٪ میکروسیلیس

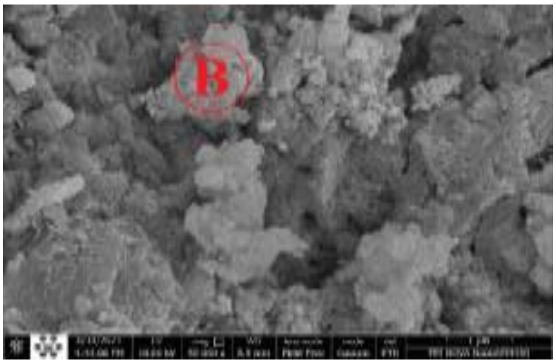
El AN Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O 8 K-series	49.47	48.29	62.88	8.51
Ca 20 K-series	28.05	27.38	14.23	0.90
Si 14 K-series	10.46	10.21	7.57	0.50
C 6 K-series	6.20	6.05	10.49	2.14
Fe 26 K-series	3.09	3.02	1.13	0.19
Al 13 K-series	2.45	2.39	1.85	0.18
K 19 K-series	1.29	1.26	0.67	0.10
Mg 12 K-series	0.69	0.67	0.57	0.09
Na 11 K-series	0.63	0.61	0.56	0.11
Ti 22 K-series	0.12	0.12	0.05	0.05
Total:	102.43	100.00	100.00	

شکل (۲۷) ریزساختار نمونه طرح ۱۹ پس از قرارگیری در دمای ۶۰۰°C را با بزرگ‌نمایی ۲۵KX نشـــان می‌دهد. نکتهٔ قابل توجه در این نمونه تشکیل مقادیر بسیار زیاد ساختار های C-S-H پس از قرارگیری در این دمای بالاست که به حضور فلدسپات در این کامپوزیت مرتبط اســت. در تحقیقات پیشـین نشـان داده شده است که ذرات فلدسپات پس از قرارگرفتن در دماهای بالا، بیشتر وارد واکنش با کامپوزیت‌های سیمانی می شوند و مقادیر بالای سیلیس غیرفعال در آنها در دماهای بالای ۴۰۰°C می‌توانند آزاد شده و ساختارهای C-S-H را تشکیل دهند. همین تصویر با بزرگ‌نمایی ۵۰KX در شکل (۲۵-ب) نشان داده شده است و

بخش A در آن برای اطمینان از ســـاختار C-S-H مورد آنالیز EDS قرار گرفته اســـت که نتایج آن در شـــکل (۲۹) و جدول (۱۱) بیان شده است. در شکل‌های ۲۷، ۲۸ و ۳۰ می‌توان آثار خروج بخار آب در این دمای بالا را به صـــورت حفره های کوچک و متصـــل به هم در ریزســـاختار ملاحظه کرد که در تصـــاویر مربوط به پیش از قرارگرفتن در حرارت اثری از آنها وجود نداشت.

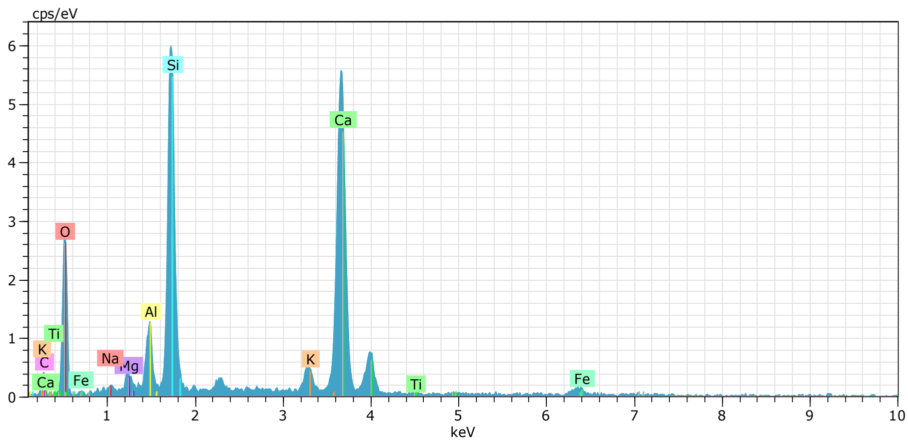


شکل ۲۷ ریزساختار نمونه طرح ۱۹ پس از قرارگیری در دمای ۶۰۰°C



شکل ۲۸ ریزساختار نمونه طرح ۱۹ پس از قرارگیری در دمای ۶۰۰°C

طیف‌ســـنجی پرتو ایکس پراکندهٔ انرژی (EDS، EDX یا XEDS) یک تکنیک تحلیلی اســـت که برای آنالیز عنصـــری یا خصوصیات شیمیایی یک نمونه به کار می‌رود. این بررسی بر تعامل برخی از منابع تحریک اشـــعه ایکس و یک نمونه تکیه دارد. قابلیت‌های آن تا حدودی به این سبب است که هر عنصر دارای یک ساختار اتمی ویژه است که اجازه می‌دهد مجموعه‌ای منحصـــر به فرد از قله‌ها در طیف اشـــعهٔ ایکس آن وجود داشـــته باشـــد. برای تحریک انتشـــار پرتوهای X از یک نمونه، یک پرتو پرانرژی از ذرات باردار مانند الکترون‌ها یا پروتون‌ها یا پرتوی از اشعهٔ ایکس، در نمونهٔ مورد مطالعه متمرکز می‌شود. در حالت اســـتراحت، یک اتم درون نمونهٔ حاوی الکترون‌های حالت پایه (تحریک نشده) در سطوح انرژی گسسته یا لایه‌های الکترونی متصل به هسته است. پرتو الکترونی فرودی ممکن است یک الکترون را در یک پوستهٔ داخلی تحریک کند و آن را از پوسته بیرون بیاورد و در جایی که الکترون وجود داشـــت یک حفرهٔ الکترونی ایجاد کند. ســـپس یک الکترون از یک لایهٔ بیرونی با انرژی بالاتر حفره را پر می‌کند و تفاوت انرژی بین پوســـتهٔ پرانرژی بالاتر و لایهٔ انرژی پایین‌تر ممکن اســـت به شـــکل پرتو ایکس آزاد شود. تعداد و انرژی پرتوهای ایکس ساطع شده از یک نمونه را می توان با یک طیف ســـنج پراکندهٔ انرژی اندازه‌گیری کرد. از آنجا که انرژی پرتوهای X تفاوت انرژی بین دو پوســـته و ســـاختار اتمی عنصـــری اســـت که از آن ســـاطع شده‌اند، این امر امکان اندازه‌گیری ترکیب عنصر نمونه را فراهم می‌آورد.

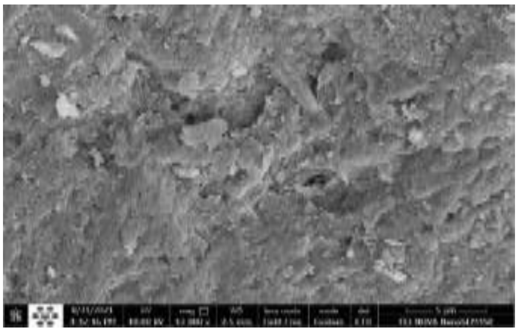


شکل ۲۹ آنالیز EDS طرح ۱۹ حاوی ۱۰٪ فلدسپات و ۵٪ میکروسیلیس پس از قرارگیری در دمای ۶۰۰°C

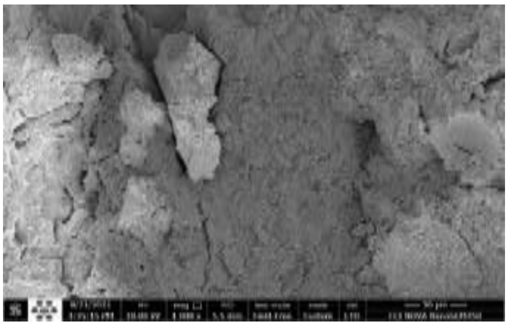
جدول ۱۱ نتایج آنالیز EDS طرح ۱۹ حاوی ۱۰٪ فلدسپات و ۵٪ میکروسیلیس پس از قرارگیری در دمای ۶۰۰°C

El AN Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O 8 K-series	43.86	45.20	58.55	8.30
Ca 20 K-series	25.67	26.45	13.68	0.85
Si 14 K-series	12.56	12.95	9.56	0.61
C 6 K-series	7.40	7.63	13.17	2.69
Al 13 K-series	2.80	2.89	2.22	0.21
K 19 K-series	2.18	2.25	1.19	0.14
Fe 26 K-series	1.12	1.16	0.43	0.12
Mg 12 K-series	0.87	0.89	0.76	0.11
Na 11 K-series	0.39	0.40	0.36	0.09
Ti 22 K-series	0.18	0.18	0.08	0.06
Total:	97.03	100.00	100.00	

در شکل (۳۱) ناحیهٔ اتصال بین سنگدانه و خمیره ملاحظه می‌شود. همانطور که در تصویر مشخص است، جداشدگی در برخی نواحی ITZ قابل تشخیص است و این امر می‌تواند به وجود آب در این نواحی مربوط باشد که بعد از قرارگرفتن در حرارت بالا به علت فشار ناشی از خروج بخار آب، باعث جداشدگی و ترک در ناحیهٔ انتقال شده است. ساختار کلی خمیره پس از قرارگرفتن در حرارت بالا دارای تخلخل و حفرات بسیار کمی است که می‌توان آن را به حضور و واکنش‌های فلدسپات در ساختار نمونه نسبت داد.



شکل ۳۰ ریزساختار نمونه طرح ۱۹ پس از قرارگیری در دمای ۶۰۰°C



شکل ۳۱ ریزساختار نمونه طرح ۱۹ پس از قرارگیری در دمای ۶۰۰°C

مقایسهٔ نتایج با نتایج دیگر مطالعات پژوهشگران

خرمی و همکاران [34] به بررسی امکان‌سنجی تسلیح کامپوزیت‌های سیمانی با برخی از الیاف طبیعی حاصل از ضایعات پرداختند. آنها دریافتند که الیاف کرافت و باگاس در افزایش مقاومت خمشی کامپوزیت عملکرد مناسبی داشتند و الیاف اکالیپتوس بر بهبود رفتار خمشی کامپوزیت سیمانی در مقایسه با نمونهٔ شاهد تأثیر چندانی نداشت. از مقایسهٔ نتایج پژوهش حاضر با پژوهش خرمی و همکاران [34] درمی‌یابیم که مقاومت خمشی کامپوزیت‌های سیمانی حاوی الیاف کرافت افت زیادی نسبت به مقاومت خمشی به دست آمده در پژوهش حاضر را به ما نشان می‌دهد. مهم‌ترین علت این موضوع طول کوتاه (حدود ۰/۸ میلی‌متر) الیاف به کار برده شده در تحقیق مذکور است. در پژوهش حاضر الیاف فلزی مورد استفاده به طول ۱۳ میلی‌متر بود. طول کوتاه الیاف کرافت به خمیر سیمان تنش وارد می‌کند و سبب کاهش طول مهاری الیاف می‌شود. از آنجا که تنش کششی الیاف کرافت که نوعی الیاف سلولزی هستند، بسیار زیاد است در حین تحمل بار کمتر نیز احتمال پارگی الیاف وجود دارد. بر اساس تحقیق انجام شده [35] مقاومت کششی الیاف کرافت حدود ۸۰۰ مگاپاسکال است. این مقاومت کششی اندک موجب سرخوردگی (بیرون‌کشیدگی) الیاف از خمیر سیمان می‌شود. بیشترین نوع شکست در حین آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های کامپوزیتی مشاهده می‌گردد. به نظر می‌رسد با افزایش طول الیاف که تأمین کنندهٔ چسبندگی و پیوستگی لازم بین الیاف و خمیر سیمان است، تنش خمشی قابل تحمل نمونه‌ها افزایش یابد. نتایج تحقیق خرمی و همکاران [34] کاهش مقاومت خمشی را نشان می‌دهد. با به کار بردن میکروسیلیس به مقدار ۵٪ وزنی جایگزین

سیمان در کامپوزیت‌های سیمانی، مقاومت خمشی همهٔ نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نسبت به سایر نمونه‌ها کاهش یافته است. بر اساس بررسی به عمل آمده به نظر می‌رسد عامل مهمی که می‌تواند در کاهش مقاومت نقش داشته باشد «خارج شدن بخش زیادی از ذرات بسیار ریز میکروسیلیس در هنگام آبکشی با دستگاه ایجاد خلاء» است. این ذرات بسیار ریز به همراه آب خروجی از منافذ ریز صفحهٔ فلزی که در کف قالب قرار داشته، خارج شده‌اند. در صورت وجود الیاف، کاهش مقاومت خمشی پذیرفتنی است؛ زیرا میکروسیلیس که جایگزین سیمان شده بود از مخلوط خارج شده است. به عبارت دیگر کاهش مقدار مواد چسباننده در مخلوط سبب کاهش مقاومت کامپوزیت سیمانی می‌شود.

قاسم‌زاده موسوی نژاد و همکاران [36] به مطالعهٔ رفتار مکانیکی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک کامپوزیت سیمانی مسلح به الیاف تحت بارگذاری داخلی یکنواخت پرداختند و دریافتند که استفاده از دودهٔ سیلیسی موجب افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی به ترتیب تا ۲۷٪ و ۳۲٪ می‌شود. همچنین حضور الیاف بر افزایش مقاومت فشاری اثر چشم‌گیری نداشت؛ اما موجب افزایش مقاومت خمشی تا ۲۱٪ شد. در استوانه‌های جدارنازک افزودن دودهٔ سیلیسی موجب افزایش مقاومت کششی حلقوی تا ۱۰٪ و کاهش کرنش تا ۲۸٪ می‌شود. افزودن ۵/۲ درصد و ۵/۰ درصد الیاف شیشه به ترتیب موجب افزایش ۴/۷ برابری کرنش نهایی و رشد ۳۷٪ مقاومت کششی حلقوی می‌گردد. از مقایسهٔ نتایج مقالهٔ مذکور با پژوهش حاضر مشخص شد که درصد بهینه میکروسیلیس با الیاف فولادی موجب افزایش مقاومت فشاری گردیده که در نتایج گزارش شده است. افزایش مقاومت فشاری تحت تأثیر الیاف فولادی باعث به تأخیر افتادن رشد ریز ترک‌ها و افزایش مقاومت و کرنش تحت بار حداکثر می‌شود [۳۶]. ترکیب الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن سبب افزایش مقاومت کششی می‌گردد که بیشترین مقدار افزایش آن در حدود ۲۷٪ است. به این موضوع Kayali و همکاران [37] نیز اشاره کرده‌اند. علت افزایش مقاومت ناشی از الیاف فولادی می‌تواند به واسطهٔ افزایش تحمل کرنش کششی از طریق انتقال تنش‌ها از ماتریس به الیاف باشد. با جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس به صورت مجزا و جایگزینی ترکیبی با ۳٪ نانوسیلیس به جای سیمان، مقاومت کششی به ترتیب ۲۵٪ و ۳۳٪ افزایش می‌یابد. به تأثیر مثبت میکروسیلیس و نانوسیلیس در افزایش مقاومت کششی در مطالعهٔ قاسم زاده موسوی نژاد و همکاران [36] اشاره شده است.

مظلوم و همکاران [38] به بررسی تأثیر نانوسیلیس بر مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی حاوی الیاف پلی-پروپیلن پرداختند و دریافتند که نمونه‌های ترکیبی دارای میکروسیلیس و نانوسیلیس، نسبت به نمونه‌های حاوی ذرات نانوسیلیس یا میکروسیلیس به صورت انفرادی نتیجهٔ بهتری داشتند. نتایج آزمایش‌های ۲۸ روزه نشان داد که ترکیب ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱٪ نانوسیلیس تاثیر مطلوبی در مقاومت فشاری، کششی و خمشی کامپوزیت سیمانی گذاشت. مقدار افزایش مقاومت فشاری ۶۹/۴٪، مقاومت کششی ۸۸/۳٪ و مقاومت خمشی ۳۷/۳٪ نسبت به نمونهٔ شاهد بود. مقدار نانوسیلیس بیشتر از ۳٪ هم در نمونه‌های ترکیبی هم در نمونه‌های بدون میکروسیلیس، نتیجهٔ منفی نسبت به نمونهٔ شاهد داشت. از مقایسهٔ نتایج بخش‌های مقاومت فشاری و کششی و خمشی پژوهش حاضر با پژوهش مظلوم و همکاران می‌توان نتیجه گرفت که وجود میکروسیلیس با هر درصدی به بهبود مقاومت فشاری و کششی و خمشی منجر شده که به علت خاصیت پوزولانی بالای این ماده است. همچنین نمونه‌های دارای نانوسیلیس دارای مقاومت بالاتری نسبت به نمونه شاهد بودند که البته به دلیل خاصیت پوزولانی این ماده است که هنگام عمل‌آوری C-S-H بیشتری تولید می‌کند. در نمونهٔ دارای ۵٪ میکروسیلیس و ۵٪ نانوسیلیس مقاومت افت کرده که به سبب بالا بودن مقدار پوزولان در طرح است. در واقع وقتی مقدار پوزولان از حدی بالاتر رود این پوزولان‌ها کامل واکنش نداده و باعث افت مقاومت می‌شوند [38]. اسفندیاری و حیدری [39] با بررسی رفتار نمونه-های بتنی ساخته شده با افزودنی‌های الیاف فلزی، میکروسیلیس، خاکستر بادی و الیاف هیبریدی تحت الگوهای مختلف بارگذاری نتیجه گرفتند که استفاده از ترکیب خاکستر بادی، میکروسیلیس و الیاف فلزی سینوسی در پارامترهای لرزه‌ای بادبندهای کمانش-ناپذیر تأثیر منفی دارد و استفاده از این ترکیب در بتن غلاف این بادبندها توصیه نمی‌شود. مظلوم و کریم‌پور [40] به بررسی تعیین پارامترهای شکست کامپوزیت‌های سیمانی الیافی دارای نانوسیلیس با استفاده از پردازش تصویر دریافتند که افزودن نانوسیلیس تا ۳٪ باعث بهبود مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه می‌شود. مقایسهٔ نتایج بخش‌های مقاومت فشاری و خمشی

پژوهش حاضر با پژوهش مظلوم و کریم‌پور نشان داد که دردرصدهای بیشتر نانوسیلیس، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. این مسئله می‌تواند ناشی از توده‌ای شدن ذرات نانو سیلیس در خمیر سیمانی باشد. افزودن نانوسیلیس تا ۳٪ در خمیر سیمانی سبب بهبود نیروی حداکثر تحمل شده در مقاومت خمشی می-گردد. بهبود اندرکنش خمیر سیمانی و الیاف دلیل بهبود رفتار خمشی است. با افزودن نانوسیلیس بیش از ۳٪ نیروی بیشینهٔ تحمل شده در خمش و مقاومت خمشی کاهش یافت. با افزودن نانوسیلیس تا ۳٪ در خمیر سیمانی به طاقت شکست اولیه و طاقت پل‌زدن الیاف و طاقت شکست در حالت ناپایدار افزوده شد. البته نسبت افزایش طاقت ناشی از پل‌زدن الیاف بیشتر از طاقت شکست اولیه است. بسطامی و همکاران [24] در پژوهشی با عنوان «بررسی آزمایشگاهی اثرات افزودن پوزولان و سرباره بر خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم» دریافتند که میکروسیلیس در افزایش مقاومت فشاری و خمشی تأثیر مثبت داشت؛ به طوری که مقاومت فشاری طرح های (G0FA0MS10) و (G10FA0MS10)، ۲۷/۸ و ۲/۳۳ درصد نسبت به نمونه مرجع بیشتر شد؛ ولی خاکستر بادی و سرباره سبب کاهش مقاومت فشاری شدند. تیرهای خمشی غیرمسلح به محض ایجاد اولین ترک، مقاومت خود را از دست دادند و نمونه-ها به دو نیم تقسیم شدند. با توجه به نتایج آزمایش مقاومت کششی، استفاده از پوزولان میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره تأثیرچندانی بر روی مقاومت کششی نداشتند و حتی باعث کاهش مقاومت کششی شدند. به عبارت دیگر در نمونه‌های دارای خاکستر بادی به دلیل واکنش شیمیایی حاصل از ترکیب این ماده با سیمان و دیگر افزودنی‌های جایگزین سیمان، مقاومت کششی کاهش پیدا کرد. آنها در خصوص آزمایشات روانی کامپوزیت سیمانی خودتراکم به این نتیجه رسیدند که استفاده از میکروسیلیس (به دلیل جذب آب) باعث کاهش روانی کامپوزیت سیمانی شد. در صورتی که خاکستر بادی و سرباره تاثیری چندانی در تغییرات روانی کامپوزیت سیمانی نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) نداشتند. این خاصیت میکروسیلیس در نتایج آزمایشات جذب آب کاملا مشهود بود.

مظلوم و اکبری جمکرانی [41] در پژوهشی با عنوان «تأثیر سربارهٔ مس بر روی مشخصات مکانیکی و انرژی شکست کامپوزیت سیمانی الیافی» نتیجه گرفتند که در نمونه‌های فاقد سربارهٔ مس و حاوی میکروسیلیس با افزایش الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست نسبت به نمونه شاهد افزایش یافتند. نمونه‌های حاوی میکروسیلیس دارای ریز ساختار بسیار همگن و متراکمی بودند؛ این موضوع دلیل اصلی خصوصیت مقاومتی مطلوب آنها به شمار می‌آید. مقاومت فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست این طرح نسبت به طرح شاهد به ترتیب ۳۴/۸٪، ۳۳/۲٪، ۲۷/۹٪ و ۲۸/۳٪ افزایش داشت.

قاسم زاده موسوی نژاد و قربانی شمشاد سرا [42] در پژوهشی با عنوان «تأثیر میکروسیلیس و نانوسیلیس بر خواص مکانیکی بتن سبک الیافی» دریافتند که با جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس به صورت جداگانه و ترکیبی با ۳٪ نانوسیلیس به جای سیمان، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش آن به ترتیب در حدود ٪۳۲ و ۴۳٪ است. الیاف پروپیلن مقاومت فشاری را کاهش داد و ترکیب الیاف فولادی و پروپیلن موجب افزایش مقاومت گردید. حضور الیاف باعث افزایش مقاومت خمشی شد. با افزایش الیاف پروپیلن از ۰ به ۱/۸ کیلوگرم بر مترمکعب برای میکروسیلیس ۱۰٪ و ۱۵٪ به ترتیب افزایش در حدود ۱۰٪ و ۶/۷٪ مشاهده شد. همچنین ترکیب الیاف فولادی و پروپیلن با ۱۰٪ میکروسیلیس به حداکثر مقدار مقاومت خمشی در حدود ۳۸/۷۵٪ افزایش یافت. وجود الیاف باعث افزایش مقدار جذب آب گردید. به این ترتیب بر اساس رده‌بندی CEB بیشتر نمونه‌ها در محدوده خوب طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین کاهش جذب آب این بتن‌ها توسط میکروسیلیس کمتر از نانوسیلیس بود.

پیمان [43] در پژوهشی به مطالعهٔ بررسی اثر ترکیبی نانوسیلیس، میکرو الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بر مشخصات مکانیکی، نفوذپذیری و تهاجم کلریدی کامپوزیت سیمانی پرداخت و نتایج حاکی از آن بود که حضور همزمان نانوسیلیس، میکرو الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی ۹۰ روزه به ترتیب منجر به افزایش ۵۹/۳، ۳۲/۳، ۶۷/۲ و ۲۵/۹ درصدی مقاومت فشاری، خمشی، کششی و چقرمگی خمشی در مقایسه با نمونه شاهد شده است. کاهش نرخ جذب آب و افزایش دوام در برابر تهاجم کلریدی از دیگر نتایج قابل توجه حاصل از این پژوهش بوده است. در مقایسهٔ پژوهش حاضر با نتایج سه مقالهٔ فوق [41-43] نمونه‌های فاقد فلدسپات و حاوی

میکروسیلیس با افزایش الیاف فلزی نسبت به نمونه شاهد مقاومت فشاری، کششی و خمشی بیشتری را نشان دادند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی مشخصات مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی حاوی فلدسپات، دودهٔ سیلیس و الیاف فلزی کوتاه می‌پردازد. در راستای دستیابی به این اهداف آزمایشات مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی به روش مستقیم، درصد جذب آب اولیه و نهایی، مقاومت الکتریکی و بررسی ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجا شد و پس از بررسی و تحلیل آنها نتایج زیر حاصل گردید:

۱. در هر دو گروه طرح حاوی الیاف و فاقد الیاف، جایگزینی فلدسپات با بخشی از سیمان باعث کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونهٔ شاهد شده است. حضور الیاف فولادی تا حدی اثر منفی فلدسپات بر مقاومت فشاری ۷ روزه را جبران نموده و وجود میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان باعث بهبود مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونهٔ شاهد شده است.

۲. افزایش سن عمل‌آوری تا ۲۸ روز باعث شده تا نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نتایج مطلوبی به دست آورند به طوری که بهترین نتیجه در میان طرح‌های فاقد الیاف به طرح با جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس اختصاص دارد.

۳. تمامی نمونه‌های با جایگزینی فلد سپات به صورت انفرادی نسبت به شاهد، مقاومت فشاری ۲۸ روزه کمتری نتیجه دادند. وجود الیاف در این گروه از نمونه ها باعث بهبود مقاومت فشاری شد؛ به طوری که تمامی نمونه‌های الیافی نسبت به شاهد افزایش مقاومت داشتند.

۴. نتایج نشان می‌دهد اگرچه با افزایش سن عمل‌آوری تا ۹۰ روز مقاومت فشاری افزایش یافته؛ اما همچنان مقاومت فشاری نمونه‌های با جایگزینی فقط فلدسپات (در تمام در صدهای جایگزینی) نسبت به نمونهٔ شاهد کمتر است. حضور الیاف فولادی تا حد زیادی اثر منفی جایگزینی فلدسپات را جبران نموده و باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونهٔ شاهد شده است؛ به طوری که در جایگزینی ۱۵٪ فلدسپات استفاده از ۱٪ الیاف فولادی باعث بهبود ۲۵/۷٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونهٔ شاهد شده است.

۵. در میان نمونه‌های فاقد الیاف کمترین میزان افت مقاومت فشاری بر اثر حرارت به طرح با جایگزینی ۱۵٪ فلدسپات مربوط است. در این گروه از نمونه‌ها افزایش درصد جایگزینی فلدسپات باعث کاهش میزان افت مقاومت فشاری بر اثر حرارت شده است.

۶. بر اساس نتایج وجود الیاف فولادی باعث شده میزان افت مقاومت تحت اثر دمای بالا، در برخی نمونه‌ها تا حد قابل‌قبولی کاهش یابد. برای مثال در نمونه طرح با جایگزینی ۵٪ فلدسپات، وجود الیاف فولادی موجب شده میزان افت مقاومت فشاری از ۶۷/۵٪ به ۴۰/۸٪ کاهش یابد.

۷. همهٔ نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی بدون توجه به درصد جایگزینی فلدسپات و میکروسیلیس، مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونهٔ شاهد نتیجه دادند. کاربرد فلدسپات به صورت انفرادی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بر نتایج مقاومت خمشی تأثیر چندانی ندارد؛ اما افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس باعث بهبود مقاومت خمشی شده است.

۸. در میان نمونه‌های حاوی الیاف بهترین مقاومت خمشی در نمونه‌های با جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱۰٪ فلدسپات به دست آمد؛ به طوری که به ترتیب ۴۶٪ و ۲۹٪ مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونهٔ شاهد نتیجه دادند.

۹. طبق نتایج حرارت بر کاهش طاقت خمشی نمونه‌ها اثر چشم‌گیری دارد؛ به طوری که قرارگرفتن تحت اثر دمای ۶۰۰°C باعث شده ضریب طاقت خمشی به طور متوسط ۸۰/۶٪ کاهش یابد. در میان نمونه‌های حرارت ندیده بیشترین مقدار ضریب طاقت خمشی به طرح با جایگزینی ۵٪ فلدسپات مربوط است.

۱۰. بررسی نتایج حاصل از آزمایش کشش مستقیم تأثیر چشمگیر الیاف فولادی بر افزایش مقاومت کششی کامپوزیت‌های سیمانی حاوی میکروسیلیس و فلدسپات را نشان می‌دهد؛ به طوری که استفاده از ۱٪ الیاف فولادی کوتاه موجب شده مقاومت کششی به طور متوسط ۳۹٪ افزایش یابد. بیشترین افزایش مقاومت کششی بر اثر حضور الیاف به طرح با جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس مربوط است.

۱۱. افزایش درصد جایگزینی فلدسپات تا ۱۵٪ درصد سبب کاهش جذب آب نسبت به نمونهٔ شاهد شده است. افزایش

درصد جایگزینی میکروسیلیس با پر کردن حفرات بسیار ریز در ساختار کامپوزیت سیمانی، باعث کاهش جذب آب اولیه و نهایی شده است؛ به طوری که کمترین میزان جذب آب در میان همهٔ نمونه‌ها به طرح با جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس اختصاص دارد.

۱۲. نمونهٔ شاهد در مقایسه با نمونه‌های با جایگزینی فلدسپات به صورت انفرادی، مقادیر بالاتر مقاومت الکتریکی را نتیجه داده است که بیانگر ساختار متراکم‌تر نمونهٔ شاهد نسبت به این نمونه‌هاست. کاربرد میکروسیلیس در مخلوط کامپوزیت سیمانی تا حد زیادی باعث افزایش نتایج مقاومت الکتریکی شده است این موضوع به ویژه در جایگزینی ۱۵٪ مشاهده می‌شود.

۱۳. با توجه به نتایج ریزساختار نمونه طرح ۱۹، ساختار کلی خمیره پس از قرارگرفتن در حرارت بالا، تخلخل و حفرات بسیار کمی داشت که می‌توان آن را به حضور و واکنش‌های فلدسپات در ساختار نمونه نسبت داد. نکتهٔ قابل توجه در طرح مذکور این است که پس از قرارگیری نمونه در دمای ۶۰۰°C مقادیر بسیار زیادی از ساختار های C-S-H در آن مشاهده شد که این موضوع به حضور فلدسپات در این کامپوزیت مرتبط است.

واژه نامه

ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی
Scanning Electron Microscope

مواد مکمل سیمانی
Materials Cementing Supplementary

تست کشش بریکت — Briquette Tensile Test

انجمن مواد و آزمون آمریکا
American Society for Testing and Materials

طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (XEDS, EDX, EDS)

مگاپاسکال — MPa

سپاسگزاری

مراجع

[1] A. M. Neville, J. J. Brooks, “Concrete Technology,” *England Longman Scientific & Technical*, (1987).

[2] C., Shi, & J., Qian, High performance cementing materials from industrial slags—a review. *Resources, conservation and recycling*, Vol. *29, No.* 3, pp. 195-207, (2000). doi.org/10.1016/S0921-3449(99)00060-9.

[3] R. L., Day, & C., Shi, Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural-pozzolan cement pastes. *Cement and Concrete Research*, *24*(8), 1485-1491, (1994). doi.org/10.1016/0008-8846(94)90162-7.

[4] R. Detwiler, P. Mehta, “Chemical and Physical Effects of Silica Fume on the Mechanical Behavior of Concrete,” *Materials,* vol. 86, no. 6, pp. 609-614, (1989).

[5] G. A. Rao, “Investigations on the Performance of Silica Fume-Incorporated Cement Pastes and Mortars,” *Cement and Concrete Research,* vol. 33, no. 11, pp. 1765-1770, (2003).

[6] M. Mazloom, A. A. Ramezanianpour, J. J. Brooks, “Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High-Strength Concrete,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, no. 4, pp. 347-357, (2004).

[7] C. S. Poon, S. C. Kou, L. Lam, “Compressive Strength, Chloride Diffusivity and Pore Structure of High Performance Metakaolin and Silica Fume Concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 20, no. 10, pp. 858-865, (2006).

[8] K. Sirijaroonchai, S. El-Tawil, G. Parra-Montesinos, “Behavior of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites Under Multi-Axial Compressive Loading,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 1, pp. 62-72, (2010).

[9] S. H. Kang, T. H. Ahn, D. J. Kim, “Effect of Grain Size on the Mechanical Properties and Crack Formation of

HPFRCC Containing Deformed Steel Fibers," *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 5, pp. 710-720, (2012).

[10] A. Dehghani, F. Nateghi Elahi, "Experimental and Analytical Estimation of Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites (ECC) With Polyvinyl Alcohol Fibers," *Sharif Journal of Civil Engineering*, vol. 30-2, no. 1.1, pp. 45-57, (2014).

[11] J. I. Choi, K. I. Song, J. K. Song, B. Y. Lee, "Composite Properties of High-Strength Polyethylene Fiber-Reinforced Cement and Cementless Composites," *Composite Structures*, vol. 138, pp. 116-121, (2016).

[12] M. TavakliZadeh, A. Ramezani, E. Zafarkhah, S.D. Ghafarian, S.F. Kazemi, "The Effect of Microsilica on Compressive Strength and Its Growth Process in Cement Mortars," *5th National Congress of Civil Engineering*, Iran, Ferdowsi University of Mashhad, (2010).

[13] M. H. Saghafi, H. Shariatmadar, A. Kheyroddin, "Experimental Evaluation of Mechanical Properties of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Concrete Research*, vol. 9, no. 2, pp. 29-42, (2017).

[14] V., Kumar, A. Imam, V. Srivastava, Y, Kushwaha, "Effect of Micro Silica on the Properties of Hardened Concrete," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 13, no. 11, pp. 8-12, (2017).

[15] R. Mu, Z. Wang, X. Wang, L. Qing, H. Li, "Experimental Study on Shear Properties of Aligned Steel Fiber Reinforced Cement-Based Composites," *Construction and Building Materials*, vol. 184, pp. 27-33, (2018).

[16] F. Moodi, A. A. Ramezanianpour, C. Q, Bagheri, D. E, Riahi, E. Riahi dehkordi, "Evaluation of Pozzolanic Mortars Containing Micro Silica Against Acid and Chloride Attack," *Concrete Research*, vol. 12, no. 3, pp. 5-15, (2019). doi: 10.22124/jcr.2019.6693.1170.

[17] M. H. Saghafi, H. Shariatmadar, A. Kheyroddin, "Experimental Evaluation of High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites Behavior," *Sharif Journal Civil Engineering*, vol. 34.2, no. 4.1, pp. 37-46, (2019). doi: 10.24200/J30.2019.1425

[18] K. Mermerdaş, S. Ipek, Z. Algin, S. Ekmen, I. Gunes, "Combined Effects of Microsilica, Steel Fibre and Artificial Lightweight Aggregate on the Shrinkage and Mechanical Performance of High Strength Cementitious Composite," *Construction and Building Materials*, vol. 262, p. 120048, (2020).

[19] R. K. Khoshkbijari, M. F. Samimi, F. Mohammadi, P. Talebitaher, "Effects of Mica and Feldspar as Partial Cement Replacement on the Rheological, Mechanical and Thermal Durability of Self-Compacting Mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 263, p. 120149, (2020).

[20] A. Ganesh, M. Muthukannan, "Development of High Performance Sustainable Optimized Fiber Reinforced Geopolymer Concrete and Prediction of Compressive Strength,"*Journal of Cleaner Production*, vol. 282, p. 124543, (2021).

[21] A. Dalvand, M. Ahmadi, "Impact Failure Mechanism and Mechanical Characteristics of Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Cementitious Composites Containing Silica Fume," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, no. 3, pp. 736-748, (2021).

[22] M. Nanditha, S. Saikumar, "Examine on Mechanical Properties of Steel Fiber Strengthened Concrete with Silica Fume," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp.3564-3567, (2021).

[23] G. Singh, "Study on Collective Effect of Silica Fume and Steel Fiber on Strength and Durability Properties of Concrete," *Materials Today: Proceedings*, vol. 37, pp. 2256-2265, (2021).

[24] A. Bastami, F. Omidi Nasab, A. Dalvand, "Experimental Investigation of the Effects of Pozzolan and Slag Addition on Mechanical Properties of Self-Compacting Cementitious Composites," *AmirKabir Journal of Civil Engineering*, vol. 54no. 10, pp. 16-16, (2022).

[25] ASTM C33/C33M-18, "Standard Specification for Concrete Aggregates," *ASTM International, West Conshohocken*, PA, vol. 04.02, p. 8, (2023).

[26] ASTM C1602/C1602M-22, "Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete," *West Conshohocken, PA*, vol. 04.02, p.5, (2022).

[27] ASTM C109/C109M-20, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars," *West Conshohocken, PA*, vol. 04.02, p. 11, (2020).

[28] ASTM C293-16, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)," *West Conshohocken, PA*, vol. 04.02, p. 4, (2016).

[29] AASHTO T 132, "Standard Method of Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars," *American Association of State Highway and Transportation Officials*, p.10, (1987).

[30] ASTM C642-21, "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete," *West Conshohocken, PA*, vol. 04.02, p. 3, (2022).

[31]ASTM C1202-19, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," *West Conshohocken, PA*, vol. 04.02, p. 8, (2022).

[32]F. Moodi, A. Ramezanianpor, F. Farhadian, P. Dashti, "Durability of Cementitious and Geopolymer Coating Mortars Against Sulfuric Acid Attack," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 53, no, 9, pp. 3693-3708, (2021).

[33] ASTM C1609/C1609M-12, "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)," *West Conshohocken, PA*, vol. 04.02, p.8, (2019).

[34] M. Khorrami, A. Vafai, A. A. Khalilitabas, "Feasibility of Reinforcing of Cement Composite With of Natural Fiber s Obtained From Waste," *Sharif Journal of Civil Engineering*, vol. 2-26, no. 3, pp. 3-12, (2011).

[35] A. Bentur, S. Midness, Fiber reinforced cementitious composites, second ed., Taylor & Francis, (2007).

[36] S. H. Ghasemzadeh Mosavinejad, A. Saradar, B. Tahmouresi, "Mechanical Behavior of Fiber Reinforced Cementitious Composite Thin- Wall Cylindrical Shells Under Internal Loading Uniform," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 172-187, (2018).

[37] O. Kayali, M. N. Haque, B. Zhu, "Drying shrinkage of fibre - reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, no. 11, pp. 1835– 1840, (1999).

[38] M. Mazloom, S. Norouzi, M. Akbari Jamkarani, "The Effect of Nanosilica on the Mechanical Properties of Cementitious Composites Containing Polypropylene Fibers," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 25-41, (2021).

[39] J. Esfandiari, O. Heidari, "Investigation on the Behavior of Concrete with Optimum Percentage of Steel Fiber, Microsilica, Fly Ash and Hybrid Fiber Under Different Loading Pattern," *Journal of Structural and Construction*

Engineering, vol. 8, no. 6, pp. 130-150, (2021).

[40] M. Mazloom, M. Akbari Jamkarani, “Effect of copper slag on the mechanical properties and fracture energy of fiber reinforced cementitious composite,” *Amirkabir Journal of Civil Engineering,* vol. 53, no. 6, 2625-2638, (2021).

[41] M. Mazloom, H. Karimpour, “Determination of Fracture Parameters of Fiber-Reinforced Cementitious Composites Containing Nano-Silica Using Image Processing,” *AmirKabir Journal of Civil Engineering,* vol. 54, no. 12, pp. 4729-4750, (2023). dio: 10.22060/ceej.2022.21354.7689.

[42] S. H. Ghasemzadeh Mosavinejad, Y. Ghorban, “Effect of silica fume and nano silica on mechanical properties of fiber-reinforced lightweight concrete,” *Ferdowsi Civil Engineering,* vol. 31, no. 2, pp. 129-139, (2018)

[43] P. Safa, “The investigation of the combined effect of nano-silica, steel, and polypropylene microfibers on the mechanical characteristics, permeability, and chloride attack resistance of cement composite,” *Sharif Journal of Civil Engineering,* Articles in Press (2024).